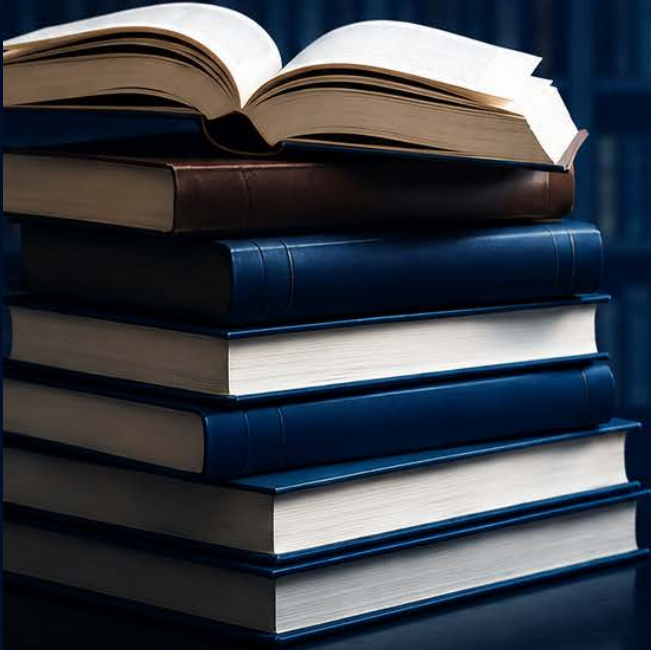


UÇAK-HAVACILIK-UZAY MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Fatih KARAMAN



yaz
yayınları

**Uçak-Havacılık-Uzay Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik
Değerlendirmeler**

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Fatih KARAMAN

yaz
yayınları

2026

**Uçak-Havacılık-Uzay Mühendisliği
Alanında Güncel Konular ve Akademik
Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Fatih KARAMAN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-95-8

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Yapay Zekâ ve Veri Tabanlı Karar Destek Sistemleriyle Havacılık Bakım-Onarım Yönetiminde Ekonomik Verimliliğin Artırılması	1
<i>Fatih KARAMAN</i>	
Aviyonik Sistemlerde Yapay Zekâ Tabanlı Arıza Tespiti, İzolasyonu ve Teşhisi.....	27
<i>Mehmet YERLİKAYA</i>	
İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Bağlantı Elemanları.....	48
<i>Özkan TOKER, Cihat AYDIN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

YAPAY ZEKÂ VE VERİ TABANLI KARAR DESTEK SİSTEMLERİYLE HAVACILIK BAKIM-ONARIM YÖNETİMİNDE EKONOMİK VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI

Fatih KARAMAN¹

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü; güvenlik, teknik güvenilirlik, operasyonel süreklilik ve ekonomik etkinliğin birlikte sağlanmasını gerektiren karmaşık bir yapıdır. Artan sistem karmaşıklığı ve veri hacmi, bakım yönetimini geleneksel arıza giderme yaklaşımından veri temelli ve öngörücü bakıma yöneltmiştir. Bakım maliyetleri yalnızca parça ve işçilikten değil, uçak yerde kalma, uçuş aksaklıkları, stok ve beklenmeyen arızalardan kaynaklanan kayıplardan da oluşmaktadır. Bu nedenle ekonomik verimlilik; maliyetlerin azaltılmasının yanı sıra doğru bakım zamanlaması ve uçak kullanılabilirliğinin artırılmasını kapsamaktadır.

Sensör, uçuş ve bakım verilerinin bütünleştirilmesi; arıza tespiti, anomali belirleme, sistem sağlığı izleme ve kalan faydalı ömür (RUL) tahminini mümkün kılmaktadır (Shenwai vd., 2025). Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve büyük veri analitiği ise bakım süreçlerinde maliyet azaltma, optimizasyon ve karar kalitesinin geliştirilmesini desteklemektedir (Zaoui, Tchuente, Wamba ve Kamsu-Foguem, 2024). Ancak ekonomik değer yaratılması, bu teknolojilerin bakım planlama, kaynak tahsisi, yedek parça yönetimi ve maliyet değerlendirmesiyle bütünleştirilmesine

¹ Dr., İstanbul Medipol Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü, ORCID: 0000-0001-5915-8054.

bağlıdır. Duan vd. (2025) maliyet temelli bakım eşiklerinin, Özcan (2025) ise RUL tahminlerinin maliyet ve risk kısıtlarıyla birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymuştur. Kabashkin ve Perekrestov (2025) da yapay zekâ destekli sistemlerin bakım kayıtları, arıza teşhisi ve teknik bilgiye erişimi geliştirebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri yalnızca maliyet azaltmaya değil; güvenlik, güvenilirlik, operasyonel süreklilik ve ekonomik verimliliğin birlikte optimize edilmesine hizmet etmektedir. Bu sistemlerin temel değeri, teknik verileri bakım zamanlaması, kaynak kullanımı ve maliyet yönetimine dönüştürerek bakım yönetimini daha öngörücü ve bütünleşik hâle getirmeleridir.

2. VERİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Dijital teknolojiler, işletmelerin karmaşıklığı yönetmesini, rekabet gücü ve kârlılığını artırmasını desteklemektedir (De Carolis, Macchi, Negri ve Terzi, 2017). Dijital dönüşüm yalnızca teknoloji kullanımını değil; strateji, yetenek yönetimi, örgüt yapısı ve liderliğin birlikte yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir (Teichert, 2019: 1673; Kane, 2017). Özellikle farklı uzmanlıkların bütünleştirilmesi, dönüşümün uygulanmasında önemli bir güçlük oluşturmaktadır (Remane, Hanelt, Wiesboeck ve Kolbe, 2017: 143; Colli vd., 2018: 1347).

Havacılık bakım-onarım yönetiminde ekonomik verimlilik, faaliyetlerin düşük maliyetle yürütülmesinin yanı sıra doğru, zamanında ve güvenilir bilgiye dayalı karar almayı gerektirmektedir. Sensör, aviyonik ve elektronik sistemlerden elde edilen verilerin bütünleştirilerek bakım kararlarına dönüştürülmesi temel gerekliliktir (Gill ve Fay, 2024; Kabashkin ve Susanin, 2024a).

Bu kapsamda dijitalleşme, bakım yönetimini manuel kayıt ve sabit takvimlerden gerçek zamanlı veri, elektronik kayıt, analitik, durum izleme ve tahmine dayalı bakımı içeren bütünleşik bir yapıya taşımaktadır (IATA, 2024a). Yapay zekâ ve veri analitiği ise mevcut sistem durumunu ve arıza olasılıklarını değerlendirerek bakım yönetimini reaktif problem çözmeden proaktif risk ve kaynak yönetimine dönüştürmektedir (Bala vd., 2024; Costa vd., 2026).

2.1. Bakım Verileri

Bakım verileri; hava aracının teknik durumunun izlenmesi, arıza tespiti, bakım planlaması ve komponent yaşam döngüsünün yönetiminde temel bilgi kaynağıdır. Sensör, uçuş, komponent, arıza, teknisyen ve bakım kayıtlarının bütünleştirilmesi, verilerin bakım kararlarına dönüştürülmesini sağlamaktadır (Gil ve Fay, 2024; Kabashkin ve Susanin, 2024b). Sensör teknolojileri ve yapay zekâ ise sürekli izleme ve tahmine dayalı bakımı desteklemektedir (Costa vd., 2026).

Verinin ekonomik değeri yalnızca miktarına değil; kalite, doğruluk, güncellik, erişilebilirlik ve bütünleştirilebilmesine bağlıdır. Farklı veri kaynaklarının entegrasyonu tahmine dayalı bakım için gerekli olmakla birlikte, veri heterojenliği ve sensör güvenilirliği önemli sorunlar oluşturmaktadır (Costa vd., 2026; Kabashkin ve Susanin, 2024a). Gerçek zamanlı verilerin geçmiş bakım kayıtlarıyla birleştirilmesi, komponent performansındaki değişimlerin izlenmesini ve daha doğru bakım kararlarını desteklemektedir.

Bununla birlikte veri sahipliği, güvenlik, ticari hassasiyet ve standardizasyon sorunları veri paylaşımını sınırlayabilmektedir (Kabashkin ve Susanin, 2024a). Elektronik bakım kayıtlarının yaygınlaşması ise verilerin saklanması ve analitik kullanımını kolaylaştırmaktadır (IATA, 2024b). Sonuç olarak kaliteli ve bütünleşik veri altyapısı, yapay zekâ ve veri

analitiğinin etkinliğinin temel koşuludur; havacılık bakımında ekonomik ve operasyonel verimlilik için “önce veri, sonra analitik” yaklaşımı benimsenmelidir.

2.2. Veri Analitiği

Veri analitiği, karmaşık veri kümelerinden örüntü ve eğilimler çıkararak arıza, komponent performansı, anomali, bakım gereksinimi, RUL ve bakım zamanlamasının değerlendirilmesini sağlamaktadır (Bala vd., 2024; Costa vd., 2026). Tanımlayıcı, tanısal, tahmine dayalı ve kuralcı analitik yaklaşımlar sayesinde bakım yönetimi geçmiş değerlendirmesinden geleceğe yönelik öngörü ve eyleme taşınmaktadır. Bala vd. (2024), veri analitiği ve yapay zekânın tahmine dayalı bakımın doğruluğunu ve uyarlanabilirliğini artırdığını belirtmektedir.

Gerçek zamanlı ve geçmiş verilerin bütünleştirilmesi; anomali tespiti, komponent sağlık izleme, arıza ve RUL tahminlerini desteklemektedir (Kabashkin ve Susanin, 2024b; Costa vd., 2026). Analitik modellerde uçuş profili, çevresel koşullar, kullanım yoğunluğu ve bakım geçmişinin birlikte değerlendirilmesi daha güvenilir sonuçlar sağlayabilmektedir (Chia, Verhagen, Silva ve Cole, 2024). Dijital ikizler ise bakım faaliyetlerinin yaşam döngüsü boyunca izlenmesini ve operasyonel kararların optimize edilmesini desteklemektedir (Bisanti, Mainetti, Montanaro, Patrono ve Sergi, 2023).

Veri analitiği ayrıca hangar kapasitesi, iş gücü, ekipman, yedek parça ve stok yönetiminin dinamik biçimde planlanmasına katkı sağlamaktadır (Liu vd., 2025). Bununla birlikte veri yetersizliği, heterojenlik, sensör güvenilirliği ve model açıklanabilirliği önemli sınırlılıklardır. Li vd. (2024), küçük veri probleminin prognostik modeller açısından önemli bir sorun olduğunu; Costa vd. (2026) ise veri heterojenliği ve düzenleyici gerekliliklerin kritik olduğunu belirtmektedir. Dolayısıyla veri

analitiğinin başarısı, veri miktarından çok kaliteli, standartlaştırılmış ve operasyonel bağlamla bütünleştirilmiş veri altyapısına bağlıdır.

2.3. Dijital Dönüşüm

Havacılık bakım-onarım yönetiminde dijital dönüşüm, bakım kayıtlarının elektronikleştirilmesinin ötesinde veri üretme, toplama, analiz ve karar verme süreçlerinin dijital teknolojilerle yeniden yapılandırılmasını ifade etmektedir. Elektronik kayıtların sensör, bakım geçmişi ve operasyonel verilerle bütünleştirilmesi, karar destek mekanizmalarının gelişmesini sağlamaktadır. IATA (2024a), elektronik teknik kayıtlar, uçak sağlık yönetimi, tahmine dayalı bakım, yapay zekâ ve makine öğrenmesini bu dönüşümün temel unsurları arasında göstermektedir.

Dijital dönüşümün etkinliği veri standardizasyonu ve birlikte çalışabilirliğe bağlıdır. Sensör, uçuş, bakım, komponent ve üretici verilerinin bütünleştirilmesi; komponent sağlığı izleme, arıza tahmini ve bakım uyarılarını desteklemektedir (IATA, 2024b; Kabashkin ve Susanin, 2024b). Yapay zekâ ve veri analitiği ise bakım kararlarını sabit zaman aralıklarından teknik ihtiyaçlara dayalı dinamik bir yapıya taşımaktadır (Bala vd., 2024; Costa vd., 2026).

Dijital ikizler, fiziksel sistem ile sanal model arasında sürekli veri alışverişi sağlayarak mevcut durumun izlenmesi, gelecekteki davranışın tahmini ve bakım senaryolarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Chia vd., 2024). Yapay zekâ destekli “Maintenance Advisor” gibi uygulamalar da yapılandırılmamış bakım kayıtlarını analiz ederek teknisyenlere karar desteği sunmaktadır (Kabashkin ve Perekrestov, 2025).

Dijital dönüşümün ekonomik katkısı; doğru bakım zamanlaması, gereksiz komponent değişimlerinin azaltılması, yedek parça yönetimi ve uçak yerde kalma sürelerinin düşürülmesi yoluyla ortaya çıkmaktadır. Ancak güvenlik kritik

uygulamalarda güvenilirlik, açıklanabilirlik, veri güvenliği ve sertifikasyon gereklilikleri sağlanmalıdır (Costa vd., 2026). Sonuç olarak kaliteli veri, güçlü analitik ve bütünleşik dijital altyapı; bakım planlaması, RUL tahmini, kaynak kullanımı ve maliyet optimizasyonunu güçlendirerek yapay zekâ destekli ekonomik verimliliğin temelini oluşturmaktadır.

3. KARAR DESTEK SİSTEMLERİ (KDS)

Karar Destek Sistemleri (KDS), karar alıcıların yerine geçmeden analitik destek sağlayan bilgisayar tabanlı sistemlerdir. Veri, modeller ve kullanıcıları bütünleştirerek alternatiflerin değerlendirilmesini ve daha rasyonel kararlar alınmasını desteklemektedir (Hersh, 1999: 2; Kağnıcıoğlu ve Hasgöl, 2006: 106). Özellikle yarı yapılandırılmış ve yapılandırılmamış problemlerde karar süreçlerini kolaylaştırmaktadır (Bengsghir, 1996: 370). Sistemlerin başarısında kullanıcı eğitimi ve üst yönetim desteği de önemlidir (Hersh, 1999: 396). Veri tabanı ve yönetim bilgi sistemleriyle bütünleşerek alternatiflerin analitik biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır (Liang vd., 1997: 303; Watkins vd., 1995: 33).

Havacılık bakım-onarım yönetiminde artan veri hacmi; teknik durum, uçuş programı, bakım kapasitesi, yedek parça, personel, maliyet ve güvenlik değişkenlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. KDS, farklı veri kaynaklarını ve analitik yöntemleri bütünleştirerek bilgiyi uygulanabilir bakım kararlarına dönüştürmektedir. Özellikle belirsizlik, sınırlı bakım kapasitesi ve değişken uçuş programları nedeniyle güvenlik, maliyet, bakım süresi ve filo kullanılabilirliği arasındaki dengenin kurulmasına katkı sağlamaktadır.

Havacılık bakımında teknik kayıt, arıza mesajı, bakım geçmişi, uçuş bilgileri ve teknik dokümanların bütünleştirilmesi bilgiye erişimi ve karar hızını artırmaktadır. Koornneef,

Verhagen ve Curran (2021), bu tür bir KDS'nin uygun bakım alternatiflerinin belirlenmesini ve teknik bilgiye erişimin hızlanmasını sağlayabileceğini göstermiştir. Ayrıca Deng, Santos ve Verhagen (2021), bakım kontrolü, görev ve vardiya planlamasını bütünleştiren KDS'nin kaynak kullanımını ve performans göstergelerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Belirsizlik altında karar verme açısından da KDS önemli bir araçtır. Tseremoglou ve Santos (2024), komponent sağlık tahminlerini koşula dayalı bakım planlamasıyla bütünleştirerek bakım programlarının güncellenmesini ve maliyetlerin azaltılmasını sağlamıştır. Sonuç olarak KDS, insan uzmanlığının yerine geçmekten ziyade teknik verileri ve analitik sonuçları karar süreçlerine aktararak bakım planlaması, kaynak optimizasyonu, maliyet kontrolü ve operasyonel sürekliliği destekleyen insan-merkezli sistemlerdir.

3.1. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi, KDS'nin veri işleme ve tahmin kapasitesini geliştiren temel teknolojilerdir. Makine öğrenmesi geçmiş verilerden örüntüler öğrenerek arıza tahmini, anomali tespiti ve bakım planlamasını desteklemektedir. Koul (2025), bu teknolojilerin havacılıkta tahmine dayalı bakım ve karar verme alanlarında yaygınlaştığını belirtmektedir. Andrade, Silva, Ribeiro ve Santos (2021) ise Deep Q-learning tabanlı bakım planlamasının bakım sayısını azaltarak filo kullanılabilirliğini artırabileceğini göstermiştir.

Silva, Andrade, Ribeiro ve Santos (2023), yeni bilgiler doğrultusunda bakım planlarını güncelleyen uyarlanabilir pekiştirmeli öğrenme yaklaşımını ele almıştır. Deng, Namono, Zheng, Khan ve Erkoyuncu (2024) ise büyük dil modeli tabanlı ajanların tahmin sonuçlarını uygulanabilir bakım önerilerine dönüştürebileceğini ortaya koymaktadır. Wang, Karigiannis ve Gao (2024), GPT-3.5 ile havacılık ontolojisini bütünleştirerek

arızalı komponentlerin belirlenmesi ve bakım eylemlerinin önerilmesini incelemiştir. Bu gelişmeler, yapay zekânın sayısal verilerin yanı sıra teknik bilgileri de işleyerek karar desteği sunabildiğini göstermektedir. Ancak güvenlik kritik uygulamalarda açıklanabilirlik, veri kalitesi ve insan denetimi korunmalı; yapay zekâ insan uzmanlığının yerine değil, karar kapasitesini güçlendiren bir araç olarak kullanılmalıdır.

3.2. Akıllı Bakım Yönetimi

Karar destek sistemleri ile yapay zekâ ve makine öğrenmesinin bütünleştirilmesi, havacılık bakımında akıllı bakım yaklaşımını geliştirmektedir. Akıllı bakım; sensörler, veri analitiği, yapay zekâ, makine öğrenmesi, bilgi grafikleri ve KDS'nin bütünleştirilerek hava aracının sağlık durumunun izlenmesi, arızaların öngörülmesi ve uygun bakım stratejisinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Kwakye, Jennions ve Ezhilarasu (2024), platform sağlık yönetiminin sistem ve komponentlerin bütünsel izlenmesini sağlayarak bakım kararlarını desteklediğini belirtmektedir.

Akıllı bakımda teknik bilginin yapılandırılması da önemlidir. Kang, Zhou, Guo, Zhou ve Wu (2024), ontoloji tabanlı çerçevenin bakım bilgisinin bütünleştirilmesini ve bilgi paylaşımını desteklediğini ortaya koymuştur. Meng vd. (2023), bilgi grafiklerinin arıza ve komponent ilişkilerini sistematikleştirerek uzmanlığa bağımlılığı ve değişen arıza koşullarına tepki sorununu azaltabileceğini göstermiştir. Peng ve Yang (2024) ise ticari hava araçlarında arıza, komponent ve bakım faaliyetleri arasındaki ilişkilerin bilgi grafikleriyle değerlendirilmesini ele almıştır.

Ekonomik açıdan akıllı bakım, kaynakların doğru zamanda ve doğru komponentte kullanılmasını sağlayarak maliyetlerin azaltılmasına katkı sunmaktadır. Tseremoglou ve Santos (2024), sağlık tahminleri ile bakım planlamasının

bütünleştirilmesinin maliyet azaltma potansiyelini göstermektedir.

Sonuç olarak akıllı bakım; veri, analiz, tahmin ve karar süreçlerini bütünleştiren bir yönetim yaklaşımıdır. Yapay zekâ tahmin kapasitesini, KDS karar süreçlerini, bilgi grafikleri ise teknik bilgi yönetimini güçlendirmektedir. Böylece plansız duruş ve maliyetler azaltılırken, kaynak kullanımı ve hava aracı kullanılabilirliği artırılabilir.

4. KESTİRİMCİ BAKIM

Havacılık sektöründe kestirimci bakım, veri analizi ve izleme teknolojileriyle komponentlerin arıza öncesi durumunu belirleyerek beklenmeyen arızaları azaltmayı ve bakım verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Titreşim, yağ, termografik, akustik ve sensör verilerinin analiziyle ekipman durumu ve olası arızalar tahmin edilerek bakım planlaması iyileştirilebilmektedir (Daily ve Peterson, 2016: 267). Durum izleme anormalliklerin belirlenmesine, duruma dayalı bakım ise bakım zamanının ve kalan kullanım ömrünün tahminine odaklanmaktadır (Kolerus, 2017: 5; Gerdes, Scholz ve Galar 2016: 394).

Havacılıkta teknik karmaşıklık ve değişken çalışma koşulları nedeniyle kestirimci bakım, sabit zaman aralıklı yaklaşımlara alternatif olarak uçuş, sensör ve bakım verileri üzerinden RUL, arıza olasılığı ve sağlık göstergelerini tahmin ederek bakım kararlarını proaktif hâle getirmektedir (Szrama ve Lodygowsky, 2024; Wang, Zhao ve Pham, 2025). Güler (2024), makine öğrenmesi yöntemlerinin uçak motorlarında RUL tahmininde kullanılabileceğini göstermiştir.

Bununla birlikte yalnızca tahmin doğruluğu yeterli olmayıp, sonuçların maliyet ve güvenlik dikkate alınarak bakım

kararlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Wang vd. (2025) RUL tahmini ile bakım planlamasını, Özcan (2025) ise RUL tahminini maliyet ve risk duyarlı bakım planlamasıyla bütünleştirmiştir. Yanlış tahminlerin gereksiz maliyet veya gecikmiş bakım riski oluşturması nedeniyle amaç, tahmin doğruluğu, maliyet ve güvenliği birlikte optimize etmektir. Duan vd. (2025) de sağlık göstergeleri ve bakım eşiklerinin güvenilirlik ile maliyet üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Dolayısıyla kestirimci bakım, teknik verilerden yararlanarak arıza riski, bakım zamanlaması, operasyonel gereklilikler ve ekonomik sonuçları birlikte yöneten stratejik bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

4.1. Bakım ve Operasyonel Verimlilik

Teknik sorunlar nedeniyle plansız operasyon dışı kalan uçaklar; bakım giderlerinin yanı sıra uçuş iptali, gecikme, yedek uçak kullanımı ve ekip planlaması gibi ek maliyetler doğurabilmektedir. Bu nedenle kestirimci bakımın temel amaçlarından biri, arızaları önceden belirleyerek plansız Aircraft on Ground (AOG) olaylarını azaltmaktır. Ayrıca bakım ihtiyacının önceden tahmin edilmesi, yedek parça, personel, ekipman ve bakım kapasitesinin zamanında planlanmasını sağlamaktadır.

Kestirimci bakımın bir diğer katkısı, bakımın doğru zamanda gerçekleştirilmesidir. Çok erken bakım kullanılabilir ömrün yeterince değerlendirilmemesine, gecikmiş bakım ise arıza ve AOG riskinin artmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle kestirimci bakım; gereksiz bakımı azaltarak kaynakların operasyonel ihtiyaçlarla uyumlu kullanılmasını, hava aracı kullanılabilirliğinin artırılmasını ve uçuş programının sürekliliğini desteklemektedir.

4.2.Ekonomik Verimlilik

Ekonomik verimlilik; bakım, iş gücü, yedek parça, uçak yerde kalma ve operasyonel kesinti maliyetlerinin birlikte

yönetilmesini kapsamaktadır. Geleneksel zaman esaslı bakımda kullanılabilir komponentlerin erken değiştirilmesi gereksiz maliyet yaratabilirken, kestirimci bakım teknik duruma göre bakım zamanlamasını optimize etmektedir. Duan vd. (2025), bakım kararlarında ekonomik sonuçların dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir.

Plansız arızaların ve AOG olaylarının azaltılması; uçuş iptali, gecikme, alternatif uçak ve ekip planlamasından kaynaklanan dolaylı maliyetleri de düşürebilmektedir. Bu nedenle bakım maliyeti ile güvenilirlik arasında denge kurulması önemlidir. Özcan (2025), RUL tabanlı bakım kararlarında maliyet ve risk dengesinin önemini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak optimum kestirimci bakım, en az bakımı değil, gerekli bakımın doğru zamanda yapılmasını hedeflemektedir. Wang vd. (2025), Özcan (2025) ve Duan vd. (2025) çalışmalarında RUL, bakım planlaması, risk ve maliyetin bütünleştirilmesi bu yaklaşımı desteklemektedir. Böylece sensör verileri bakım kararlarına dönüştürülerek maliyetlerin azaltılması, kaynakların etkin kullanılması ve uçak kullanılabilirliğinin artırılması sağlanabilmektedir.

5. MALİYET VE YÖNETİM

Vasigh vd.'ne (2014: 37) göre havayolu işletme giderleri; hava yolu işletim, uçak, yakıt, bakım, personel, iniş ve diğer işletme maliyetlerinden oluşmakta ve sabit veya değişken nitelik taşıyabilmektedir. Haroun (2015: 258) ise motor bakım maliyetlerinde Faaliyet Tabanlı Maliyetleme Sisteminin geleneksel yönteme göre daha doğru sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur.

Havacılık bakım-onarım faaliyetleri; güvenliğin yanı sıra maliyet, filo kullanılabilirliği ve operasyonel performansı da

etkilemektedir. Bu nedenle amaç yalnızca maliyetleri azaltmak değil, güvenilirlik, güvenlik, kaynak kullanımı ve maliyet arasında optimum dengeyi sağlamaktır. Duan vd. (2025), Wei vd. (2024) ve Weeber (2024) bakım stratejilerinin ekonomik sonuçlarının teknik performansla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

5.1. Bakım Maliyetleri

Havacılık bakım maliyetleri; personel, yedek parça, ekipman, altyapı, dış kaynak kullanımı ve uçakların operasyon dışında kalmasından kaynaklanan giderleri kapsamaktadır. Plansız bakım ise onarım maliyetlerinin yanı sıra gecikme, iptal ve AOG gibi dolaylı maliyetler oluşturmaktadır. Bu nedenle bakım maliyetleri, toplam yaşam döngüsü ve operasyon maliyeti çerçevesinde değerlendirilmelidir (Weeber, 2024). Duan vd. (2025), bakım karar eşiklerinin maliyetleri etkilediğini; Wei vd. (2024) ise derin pekiştirmeli öğrenmenin aero-motor bakımında %16,7'ye kadar maliyet azalması sağlayabildiğini göstermiştir.

Yedek parça ve stok yönetimi de önemli bir maliyet unsurudur. Yüksek stok sermaye maliyetlerini artırırken, düşük stok düzeyi tedarik gecikmesi ve AOG riskini yükseltebilmektedir. Kestirimci bakım, ihtiyaçların önceden tahmin edilmesini sağlayarak stok ve kaynak planlamasını iyileştirmektedir (Shimpi ve Sawarkar, 2026). Ayrıca MRO süresinin doğru tahmin edilmesi, kaynak kullanımını ve uçak yerde kalma sürelerinin yönetimini desteklemektedir.

5.2. Kaynak ve Maliyet Optimizasyonu

Teknisyen, lisanslı personel, hangar, ekipman, yedek parça ve bakım slotlarının birlikte değerlendirilmesi, bakım planlamasını çok kısıtlı bir optimizasyon problemine dönüştürmektedir (Filho, Mesquita, Abrahão, ve Rocha 2024). Etkin kaynak tahsisi, uçak yerde kalma süresinin azaltılması ve bakım kapasitesinin verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Filho

vd. (2024), bütünleşik planlama yaklaşımlarının bakım süresini azaltırken kaynak kullanımını iyileştirebileceğini göstermektedir.

Kaynak optimizasyonu, personel ve ekipmanın yanı sıra MRO tesislerindeki uçak hareketlerini de kapsamaktadır. Chen ve Chan (2024), gereksiz uçak hareketlerinin verimliliği düşürerek maliyetleri artırabileceğini; Zhang, Chung, Ma ve Sun. (2024) ise bakım görevlerinin kısa yer sürelerine yerleştirilmesinin gecikme riskini artırabileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle optimizasyon, yalnızca bakım süresini azaltmayı değil, bakım faaliyetlerini operasyonel programla uyumlu hâle getirmeyi gerektirmektedir.

5.3. Örgütsel ve Finansal Etkiler

Gerçek zamanlı veriler, tahmin modelleri ve optimizasyon sonuçlarıyla desteklenen insan-makine iş birliği; bakım, operasyon, tedarik zinciri ve finans birimleri arasındaki koordinasyonu güçlendirmektedir. Komponent arıza olasılığındaki artışın yedek parça, personel, hangar ve uçuş programını etkilemesi, yapay zekâ destekli sistemlerin fonksiyonlar arası karar desteği olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Örgütsel dönüşümün finansal etkileri; doğrudan bakım maliyetlerinin yanı sıra uçak kullanılabilirliği, operasyonel süreklilik, stoklar ve AOG riskleri üzerinden de ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bakım birimi, maliyet oluşturan bir fonksiyonun ötesinde filo kullanılabilirliği ve operasyonel sürekliliği destekleyen stratejik bir yapı olarak değerlendirilmelidir. Chen ve Chan (2024) ile Zhang vd.'ne (2024) göre bakım kararlarının optimizasyonu, havayollarının rekabetçiliğini etkileyebilmektedir.

Veri bakım ihtiyacını tahmin ederken, yapay zekâ alternatifleri değerlendirmekte ve optimizasyon kaynakları etkin biçimde tahsis etmektedir. Duan vd.'ne (2025) göre kestirimci bakımın maliyet modelleriyle bütünleştirilmesi ekonomik bakım

eşiklerinin belirlenmesini sağlarken, Wei vd.'ne (2024) göre yapay zekâ ve optimizasyon güvenilirlik ile maliyet hedeflerinin birlikte yönetilmesine katkı sunmaktadır. Bu nedenle ekonomik verimlilik, maliyeti azaltmaktan ziyade güvenlik ve güvenilirliği koruyarak daha az kaynakla daha yüksek operasyonel değer üretmek olarak ele alınmalıdır.

6. UYGULAMALAR VE GELECEK

Zaoui vd. (2024), yapay zekânın tahmine dayalı analitik ve kaynak optimizasyonu yoluyla havacılıkta operasyonel verimliliği desteklediğini belirtmektedir. Ancak ekonomik değer yaratılması, teknik doğruluğun yanı sıra sistemlerin MRO süreçleri, veri altyapısı ve yönetsel kararlarla bütünleşmesine bağlıdır. İlk dönemlerde arıza sonrası gerçekleştirilen bakım, önleyici ve planlı bakım yaklaşımlarıyla geliştirilmiş; ancak gerçek zamanlı durum izleme sınırlı kalmıştır (Kapoor, Dharwada, Iyengar, Greenstein ve Gramopadhye, 2004: 199; Kiyak, 2012: 9; Ahmadi, Söderholm ve Kumar, 2010: 229). Günümüzde büyük veri ve yapay zekâ arıza tahminini, IoT gerçek zamanlı veri aktarımını destekleyerek bakım yönetiminin reaktif yapıdan proaktif ve veri odaklı yapıya dönüşmesini sağlamaktadır (Ma vd., 2022: 164; Lohmann ve Pereira, 2020: 95; Liu vd., 2025: 1).

Sensör verilerinin makine öğrenmesiyle analizi, arıza olasılığı ve kalan faydalı ömür tahminlerini mümkün kılmakta; böylece bakım maliyetleri ve plansız duruşlar azaltılabilmektedir (Dagal vd., 2025; Singh, Shringi, Chaturvedi ve Kumar, 2025). Bakım ve uçuş verilerinin bütünleştirilmesi ise hangar, iş gücü ve kaynak planlamasını iyileştirerek bekleme süreleri ve maliyetleri azaltmaktadır (Kabashkin ve Susanin, 2024b). Ayrıca yapay zekâ ve IoT, arıza teşhisi, teknik bilgiye erişim ve teknisyen desteği sağlayarak MRO süreçlerini sistematikleştirmektedir (Kabashkin

ve Perekrestov, 2024). Sonuç olarak yapay zekâ destekli MRO uygulamaları; maliyetleri azaltma, kaynak kullanımını optimize etme ve uçak kullanılabilirliğini artırma yoluyla ekonomik ve operasyonel performansı geliştiren stratejik karar mekanizmalarıdır.

6.1. Uygulama Sorunları

Yapay zekâ ve veri tabanlı karar destek sistemlerinin havacılık bakım-onarım süreçlerine entegrasyonu, veri, yatırım ve yönetsel açıdan çeşitli sorunlar içermektedir. Farklı sistemlerden gelen verilerin uyumsuzluğu, eksik kayıtlar ve yapılandırılmamış raporlar yapay zekâ güvenilirliğini sınırlayabilmektedir (Kabashkin ve Perekrestov, 2024). Ayrıca veri senkronizasyonu, yüksek hesaplama gereksinimleri ve MRO sistemleriyle entegrasyon önemli teknik sorunlardır.

Sensör altyapısı, veri sistemleri, yazılım entegrasyonu ve personel eğitimleri yüksek başlangıç maliyetleri oluşturmaktadır. Bununla birlikte Dagal vd. (2025) ile Kabashkin ve Susanin'e (2024b) göre yapay zekâ; plansız bakım, AOG, gereksiz komponent değişimi, iş gücü ve stok maliyetlerini azaltarak yaşam döngüsü maliyetlerinde iyileşme sağlayabilir.

Son olarak yapay zekâ, bakım uzmanlarının yerine geçen otonom bir yapıdan ziyade kararları destekleyen insan-merkezli bir araç olarak kullanılmalıdır. Açıklanabilirlik, siber güvenlik ve mevzuata uyum da özellikle emniyet kritik uygulamalarda temel gerekliliklerdir. Bu nedenle başarılı MRO dönüşümü; algoritmik performans, veri yönetimi, insan denetimi, güvenlik ve düzenleyici uyumun birlikte sağlanmasına bağlıdır.

6.2. Gelecek Perspektifi

Havacılık bakım-onarım yönetiminde yapay zekâ ve veri tabanlı karar destek sistemlerinin daha bütünleşik, gerçek zamanlı ve öngörücü bir yapıya dönüşmesi beklenmektedir. Uçak,

komponent, personel, yedek parça, uçuş programı ve maliyet verilerinin birlikte değerlendirilmesi, teknik ve ekonomik sonuçların bütünsel yönetimini sağlayacaktır. Dijital ikizlerin sensör verileriyle sürekli güncellenmesi, komponent durumunun izlenmesi ve olası bozulmaların öngörülmesini destekleyecektir. Kabashkin ve Susanin (2024a), gerçek zamanlı sağlık izleme, arıza olasılığı ve ekonomik değerlendirmenin birlikte ele alındığı yaşam döngüsü yönetiminin önemini vurgulamaktadır.

Üretken yapay zekâ ve büyük dil modellerinin MRO süreçlerindeki kullanımının da yaygınlaşması beklenmektedir. Teknik doküman ve bakım kayıtlarının işlenmesi bilgiye erişimi hızlandırırken, çok modlu yapay zekâ farklı veri türlerini bütünlükten çıkararak karar desteği sunabilecektir. Ancak kritik havacılık kararlarında veri güvenilirliği, model açıklanabilirliği ve doğrulama süreçlerinin güçlendirilmesi gerekmektedir (Kalari, Lenkala, Ashok ve Mukkamala, 2025).

Gelecekte ekonomik optimizasyonun MRO kararlarının merkezine yerleşmesiyle bakım stratejileri, onarım-değişim kararları, stoklar ve kapasitenin birlikte optimize edilmesi mümkün olacaktır. Kabashkin ve Susanin (2024b), teknik güvenilirlik ile ekonomik değerlendirmenin bütünsel ele alınmasının önemini belirtmektedir. Sonuç olarak geleceğin MRO yapısının insan uzmanlığı, yapay zekâ, gerçek zamanlı veri ve ekonomik optimizasyonun bütünlükten hibrit karar destek sistemleri üzerine şekillenmesi beklenmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılık bakım-onarım faaliyetleri, uçuş emniyeti ve uçuşa elverişliliğin yanı sıra maliyet ve operasyonel performans açısından stratejik bir yönetim alanıdır. Artan teknik karmaşıklık ve veri hacmi, bakım yönetimini reaktif yapıdan veri analitiği ve tahmine dayalı karar mekanizmalarını içeren proaktif bir yapıya

dönüştürmektedir. Bu süreçte yapay zekâ ve veri tabanlı karar destek sistemlerinin ekonomik katkısı, güvenilir veri altyapısı ve karar süreçlerine etkin entegrasyonla mümkün olmaktadır.

Bakım verilerinin uçuş, sensör, arıza, komponent, stok ve maliyet bilgileriyle bütünleştirilmesi, teknik durumun doğru değerlendirilmesini ve kaynakların etkin tahsisini sağlamaktadır. Özellikle makine öğrenmesi tabanlı kestirimci bakım, arıza olasılığı ve kalan faydalı ömür (RUL) tahminleriyle gereksiz bakım maliyetlerini, plansız arızaları, AOG ve operasyonel kesinti risklerini azaltabilmektedir. Bu nedenle ekonomik verimlilik, yalnızca bakım giderlerinin değil, toplam yaşam döngüsü maliyeti ve operasyonel riskin birlikte optimize edilmesini gerektirmektedir.

Ekonomik optimizasyon güvenlik ve uçuşa elverişlilikten bağımsız değerlendirilmemelidir. Yapay zekâ sistemlerinin nihai karar verici yerine, bakım uzmanlarının karar kalitesini artıran insan-merkezli araçlar olarak kullanılması önem taşımaktadır. Bununla birlikte eksik ve standartlaştırılmamış veriler, sistem uyumsuzlukları, yüksek yatırım maliyetleri, siber güvenlik, açıklanabilirlik ve çalışanların teknolojiye uyumu önemli uygulama sorunlarıdır.

Bu doğrultuda havayolu ve MRO kuruluşlarının standartlaştırılmış bakım veri altyapıları oluşturmaları; uçuş, sensör, bakım, stok ve maliyet verilerini bütünleştirmeleri önerilmektedir. Yapay zekâ uygulamaları öncelikle RUL tahmini, plansız arıza öngörüsü, yedek parça optimizasyonu ve iş gücü planlaması gibi alanlarda pilot olarak uygulanmalı; sonuçlar bakım maliyeti, AOG süresi, plansız bakım oranı ve uçak kullanılabilirliği gibi göstergelerle değerlendirilmelidir.

Gelecekte yapay zekâ, büyük veri, IoT ve dijital ikizlerin bütünleştiği öngörücü bakım ekosistemlerinin önem kazanması beklenmektedir. Bu sistemler teknik durum, güvenlik, maliyet ve

operasyonel performansı aynı karar çerçevesinde değerlendirerek bakım yönetimini daha proaktif ve ekonomik hâle getirebilecektir. Sonuç olarak veriye dayalı bakım dönüşümü; kaliteli veri, güvenilir analitik, insan uzmanlığı ve güvenlik odaklı yönetişimin birlikte yönetilmesine bağlıdır.

KAYNAKÇA

- Ahmadi, A., Söderholm, P., & Kumar, U. (2010). On aircraft scheduled maintenance program development. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 16(3), 229-255.
- Andrade, P., Silva, C., Ribeiro, B., & Santos, B. F. (2021). Aircraft maintenance check scheduling using reinforcement learning. *Aerospace*, 8(4), 113.
- Bala, A., Rashid, R. Z. J. A., Ismail, I., Oliva, D., Muhammad, N., Sait, S. M., ... & Memon, K. A. (2024). Artificial intelligence and edge computing for machine maintenance-review: A. Bala et al. *Artificial Intelligence Review*, 57(5), 119.
- Bensghir, T. K. (1996). Bilgi teknolojileri ve örgütsel değişim.
- Bisanti, G. M., Mainetti, L., Montanaro, T., Patrono, L., & Sergi, I. (2023). Digital twins for aircraft maintenance and operation: A systematic literature review and an IoT-enabled modular architecture. *Internet of Things*, 24, 100991.
- Chen, C. Y., & Chan, I. H. (2024). The stand allocation model for aircraft MRO service provider. *Transportation Planning and Technology*, 47(5), 788-808.
- Chia, J. W., Verhagen, W. J., Silva, J. M., & Cole, I. S. (2024). A review and outlook of airframe digital twins for structural prognostics and health management in the aviation industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 398-417.
- Colli, M., Madsen, O., Berger, U., Møller, C., Wæhrens, B. V., & Bockholt, M. (2018). Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0. *Ifac-papersonline*, 51(11), 1347-1352.

- Costa, J., Torres, F. J., Hugo, R., Carmo, A., Gonçalves, P., & João, F. (2026). A Systematic Literature Review on AI-Driven Predictive Maintenance and Fault Detection in Aircraft Systems. *Applied Sciences*, 16(7), 3381.
- Dagal, I., Erol, B., Mbasso, W. F., Harrison, A., Demirci, A., & Cali, U. (2025). A data-driven approach to aircraft engine MRO using enhanced ANNs based on FMECA. *IEEE Access*, 13, 124710-124733.
- Daily, J., & Peterson, J. (2016). Predictive maintenance: How big data analysis can improve maintenance. In *Supply chain integration challenges in commercial aerospace: A comprehensive perspective on the aviation value chain* (pp. 267-278). Cham: Springer International Publishing.
- De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., & Terzi, S. (2017). A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. In *IFIP international conference on advances in production management systems* (pp. 13-20). Cham: Springer International Publishing.
- Deng, H., Namooano, B., Zheng, B., Khan, S., & Erkoyuncu, J. A. (2024). From prediction to prescription: Large language model agent for context-aware maintenance decision support. In *PHM Society European Conference* (Vol. 8, No. 1, pp. 10-10).
- Deng, Q., Santos, B. F., & Verhagen, W. J. (2021). A novel decision support system for optimizing aircraft maintenance check schedule and task allocation. *Decision Support Systems*, 146, 113545.
- Duan, S., Sun, J., Yu, Z., & Liu, S. (2025). Uncertain data driven predictive maintenance: A cost-oriented implementation

- method on aircraft system. *Reliability Engineering & System Safety*, 264, 111278.
- Filho, J. N. D. M., de Mesquita, A. C. P., Abrahão, F. T. M., & Rocha, G. C. (2024). An innovative method to solve the maintenance task allocation and packing problem. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 30(1), 284-305.
- Gerdes, M., Scholz, D., & Galar, D. (2016). Effects of condition-based maintenance on costs caused by unscheduled maintenance of aircraft. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(4), 394-417.
- Gill, M. S., & Fay, A. (2024). Utilisation of semantic technologies for the realisation of data-driven process improvements in the maintenance, repair and overhaul of aircraft components. *CEAS Aeronautical Journal*, 15(2), 459-480.
- Güler, O. (2024). Turbofan motorlarının kestirimci bakımında makine öğrenimi algoritmaları performanslarının karşılaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 99-106.
- Haroun, A. E. (2015). Maintenance cost estimation: application of activity-based costing as a fair estimate method. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(3), 258-270.
- Hersh, M. A. (1999). Sustainable decision making: the role of decision support systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 29(3), 395-408.
- International Air Transport Association. (2024a). *Digital aircraft operations*. <https://www.iata.org/en/programs/ops->

infra/techops/digital-aircraft-operations/?utm_source=chatgpt.com

International Air Transport Association. (2024b). *Adopting aircraft electronic records* (1st ed.). https://www.iata.org/contentassets/d1ca23709ff94de6a30e8837952a57bf/adopting-ac-electronic-records-1st-ed-2024.pdf?utm_source=chatgpt.com

Kabashkin, I., & Perekrestov, V. (2024). Ecosystem of aviation maintenance: transition from aircraft health monitoring to health management based on IoT and AI synergy. *Applied Sciences*, 14(11), 4394.

Kabashkin, I., & Perekrestov, V. (2025). Integrating big data and artificial intelligence in aircraft maintenance for enhanced efficiency and reliability. *Transportation Research Procedia*, 83, 601-608.

Kabashkin, I., & Susanin, V. (2024a). Unified ecosystem for data sharing and AI-driven predictive maintenance in aviation. *Computers*, 13(12), 318.

Kabashkin, I., & Susanin, V. (2024b). Decision-making model for life cycle management of aircraft components. *Mathematics*, 12(22), 3549.

Kağnıcıoğlu, C. H., & Hasgöl, Ö. (2006). Ana üretim planlamasında karar destek sistemlerinin kullanılması ve stoksuz üretim yapılan bir işletmede uygulama.

Kalari, S., Lenkala, G., Ashok, V., & Mukkamala, R. (2025). Employing AI/ML/DL/RL/LLM Tools to Advance Aviation Maintenance Processes for Improved Safety and Reduced Costs: A Survey. In *2025 AIAA DATC/IEEE 44th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-10). IEEE.

- Kane, G. C. (2017). Digital maturity, not digital transformation. *MIT sloan management review*, 1(1), 1-15.
- Kang, Z., Zhou, D., Guo, Z., Zhou, Q., & Wu, H. (2024). An ontology-based knowledge representation framework for aircraft maintenance processes to support work optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(11), 5577-5601.
- Kapoor, K., Dharwada, P., Iyengar, N., Greenstein, J. S., & Gramopadhye, A. K. (2004). A strategy for the development of a web-based tool to reduce aviation maintenance errors. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 48, No. 1, pp. 199-202). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Kiyak, E. (2012). The effects of aircraft preventive maintenance on reliability. *International journal of applied mathematics and informatics*, 6(1), 9-16.
- Kolerus, J. (2017). *Zustandsüberwachung von Maschinen: das Lehr-und Arbeitsbuch für den Praktiker*. expert Verlag.
- Koornneef, H., Verhagen, W. J., & Curran, R. (2021). A web-based decision support system for aircraft dispatch and maintenance. *Aerospace*, 8(6), 154.
- Koul, P. (2025). A review of machine learning applications in aviation engineering. *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, 42(1), 16-40.
- Kwakye, A. D., Jennions, I. K., & Ezhilarasu, C. M. (2024). Platform health management for aircraft maintenance: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*,

238(3), 267–283.
<https://doi.org/10.1177/09544100231219736>

Li, C., Li, S., Feng, Y., Gryllias, K., Gu, F., & Pecht, M. (2024). Small data challenges for intelligent prognostics and health management: a review: C. Li et al. *Artificial Intelligence Review*, 57(8), 214.

Liang, T. P., & Hung, S. Y. (1997). DSS and EIS applications in Taiwan. *Information Technology & People*, 10(4), 303-315.

Liu, Z., Meyendorf, N., Blasch, E., Tsukada, K., Liao, M., & Mrad, N. (2025). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twins. In *Handbook of nondestructive evaluation 4.0* (pp. 1-23). Cham: Springer Nature Switzerland.

Lohmann, G., & Pereira, B. A. (2020). Air transport innovations: A perspective article. *Tourism Review*, 75(1), 95-101.

Ma, H. L., Sun, Y., Chung, S. H., & Chan, H. K. (2022). Tackling uncertainties in aircraft maintenance routing: A review of emerging technologies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164, 102805.

Meng, X., Jing, B., Wang, S., Pan, J., Huang, Y., & Jiao, X. (2023). Fault knowledge graph construction and platform development for aircraft PHM. *Sensors*, 24(1), 231.

Özcan, H. (2025). Interpretable ensemble remaining useful life prediction enables dynamic maintenance scheduling for aircraft engines. *Scientific Reports*, 15(1), 39795.

Peng, H., & Yang, W. (2024). Knowledge graph construction method for commercial aircraft fault diagnosis based on logic diagram model. *Aerospace*, 11(9), 773.

- Remane, G., Hanelt, A., Wiesboeck, F., & Kolbe, L. (2017). Digital maturity in traditional industries—an exploratory analysis.
- Shenwai, P. G., Choudhary, A., Pokuri, T., Basak, A., Manikandan, M., & Singh, B. (2025). On the role of artificial intelligence in aerospace engineering: Current state of the art and future trajectories. *The Aeronautical Journal*, 1-27.
- Shimpi, P. M., & Sawarkar, A. (2026). Predictive maintenance for aircraft cost reduction using machine learning. *Discover Vehicles*, 2(1), 21.
- Singh, S. N. P., Shringi, R., Chaturvedi, M., & Kumar, A. (2025). A machine learning-based predictive modeling for optimizing the critical useful life of aeroengines: a field maintenance perspective. *SAE International Journal of Aerospace*, 18(2), 133-147.
- Silva, C., Andrade, P., Ribeiro, B., & F. Santos, B. (2023). Adaptive reinforcement learning for task scheduling in aircraft maintenance. *Scientific Reports*, 13(1), 16605.
- Szrama, S., & Lodygowski, T. (2024). Aircraft Engine Remaining Useful Life Prediction using neural networks and real-life engine operational data. *Advances in Engineering Software*, 192, 103645.
- Teichert, R. (2019). Digital transformation maturity: A systematic review of literature. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*, 67(6), 1673.
- Tseremoglou, I., & Santos, B. F. (2024). Condition-based maintenance scheduling of an aircraft fleet under partial observability: A deep reinforcement learning

- approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109582.
- Vasigh, B. (2014). *Foundations of airline finance: Methodology and practice*. Routledge.
- Wang, L., Zhao, X., & Pham, H. (2025). Novel formulations and metaheuristic algorithms for predictive maintenance of aircraft engines with remaining useful life prediction. *Reliability Engineering & System Safety*, 261, 111064.
- Wang, P., Karigiannis, J., & Gao, R. X. (2024). Ontology-integrated tuning of large language model for intelligent maintenance. *CIRP annals*, 73(1), 361-364.
- Watkins Jr, D. W., & McKinney, D. C. (1995). Recent developments associated with decision support systems in water resources. *Reviews of Geophysics*, 33(S2), 941-948.
- Weeber, C. (2024). Development of a cost optimal predictive maintenance strategy. *Junior Management Science*, 9(3).
- Wei, Z., Zhao, Z., Zhou, Z., Ren, J., Tang, Y., & Yan, R. (2024). A deep reinforcement learning-driven multi-objective optimization and its applications on aero-engine maintenance strategy. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 316-328.
- Zhang, Q., Chung, S. H., Ma, H. L., & Sun, X. (2024). Robust aircraft maintenance routing with heterogeneous aircraft maintenance tasks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 160, 104518.
- Zaoui, A., Tchuenta, D., Wamba, S. F., & Kamsu-Foguem, B. (2024). Impact of artificial intelligence on aeronautics: An industry-wide review. *Journal of Engineering and Technology Management*, 71, 101800.

AVİYONİK SİSTEMLERDE YAPAY ZEKÂ TABANLI ARIZA TESPİTİ, İZOLASYONU VE TEŞHİSİ

Mehmet YERLİKAYA¹

1. GİRİŞ

Modern hava araçlarında uçuş kontrolü, seyrüsefer, haberleşme, gözetim, hava veri işleme ve uçuş yönetimi gibi kritik işlevler giderek daha bütünleşik aviyonik mimariler üzerinde yürütülmektedir. Bu bütünleşme işlevselliği artırırken sensörler, eyleyiciler, hat değiştirilebilir birimler (Line Replaceable Unit, LRU), veri iletişim ağları ve elektriksel ara bağlantılar arasındaki bağımlılıkları da artırmıştır. Bu nedenle güncel arıza yönetimi yalnızca bir anormalliğin belirlenmesine değil, arızanın doğru kaynağa izole edilmesine, türünün teşhis edilmesine ve bakım kararına dönüştürülmesine odaklanmaktadır (Zolghadri, 2024; Marzat vd., 2012).

Arıza tespiti, izolasyonu ve teşhisi (Fault Detection, Isolation, and Diagnosis, FDI/FDD), aviyonik sistemlerde arıza yönetiminin birbirini izleyen ve tamamlayan temel aşamalarını oluşturmaktadır. Arıza tespiti, sistem davranışında nominal çalışma koşullarından anlamlı bir sapmanın belirlenmesini; arıza izolasyonu, tespit edilen anormalliğin kaynağının ilgili bileşen, LRU veya alt sisteme indirgenmesini; arıza teşhisi ise arızanın türünün, özelliklerinin ve mümkün olduğunda kök nedeninin ortaya konulmasını kapsamaktadır. Bu doğrultuda aviyonik arıza

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, ORCID: 0000-0001-8018-840X.

yönetimi aşağıdaki şekilde işleyen bütünlük bir süreç olarak değerlendirilebilir.



Şekil 1. Aviyonik sistemlerde arıza tespiti, izolasyonu, teşhisi ve bakım kararına ilişkin temel süreç.

Geleneksel aviyonik arıza yönetimi fiziksel yedeklilik, eşik ve tutarlılık kontrolleri, analitik yedeklilik, gözleyiciler, Kalman süzgeçleri ve yerleşik test sistemi (Built-In Test Equipment, BITE) gibi yöntemlere dayanır (Zolghadri, 2012; Patton & Chen, 1997). Bu yöntemler yüksek fiziksel yorumlanabilirlik sağlamakla birlikte karmaşık sistem modelleri, değişken uçuş koşulları ve kesikli arızalar nedeniyle sınırlanabilir. BITE ise hızlı ilk izolasyon sağlamasına karşın yanlış alarm, ikincil arıza mesajı ve arıza bulunamadı (No-Fault-Found, NFF) olaylarını tamamen ortadan kaldıramaz (Raza & Ulansky, 2018; Khan vd., 2014a, 2014b).

Son yıllarda makine öğrenmesi (Machine Learning, ML) ve derin öğrenme (Deep Learning, DL), çok değişkenli uçuş verileri ve bakım kayıtlarındaki karmaşık ilişkilerin öğrenilmesi için önemli bir tamamlayıcı araç hâline gelmiştir. Sensör ve eyleyici teşhisinde SVM, ANN, CNN, LSTM ve grafik tabanlı yöntemlerin başarılı örnekleri bulunmaktadır (Grehan vd., 2023; Kilic & Unal, 2022; Wang vd., 2022; Li vd., 2025). Bununla birlikte yüksek deneysel doğruluk tek başına operasyonel güvenilirlik anlamına gelmez. Etiketli arıza verisinin azlığı, sınıf dengesizliği, alan değişimi, bilinmeyen arızalar, açıklanabilirlik ve sertifikasyon gereksinimleri gerçek uygulamaya geçişte temel sorunlardır (Costa vd., 2026; Zolghadri, 2024).

Yapay zekâ tabanlı yaklaşımların aviyonik arıza yönetimindeki temel işlevi, geleneksel BITE yerini almak yerine, bu sistemlerin teşhis yeteneklerini çok kaynaklı veriler ve fiziksel sistem bilgisiyle desteklemektir. Bu doğrultuda BITE çıktılarının fiziksel modeller, operasyonel uçuş verileri ve bakım geçmişiyle bütünleştirilmesi; arıza belirtilerinin daha güvenilir biçimde yorumlanmasına, olası arıza kaynaklarının daha doğru izole edilmesine ve kök nedenlerin belirlenmesine katkı sağlayabilir. Böyle bir bütünleşik yaklaşım, geleneksel teşhis yöntemleri ile veri güdümlü yöntemlerin tamamlayıcı özelliklerinden yararlanarak özellikle kesikli arızalar, yanlış alarmlar ve arıza bulunamadı (NFF) olayları gibi karmaşık bakım problemlerinin çözümünde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çerçevede yapay zekâ destekli aviyonik arıza yönetimi, yalnızca arıza sınıflandırmasına odaklanan bir yapıdan ziyade, arıza tespitinden kök neden analizine ve bakım karar desteğine uzanan bütünleşik bir teşhis süreci olarak değerlendirilmektedir.

2. AVİYONİK ARIZALAR VE FDI/FDD TEMELLERİ

Aviyonik arızalar fiziksel kaynağa göre sensör, eyleyici, LRU/elektronik, veri iletişim ağı, elektriksel kablolama ve ara bağlantı sistemi (Electrical Wiring Interconnection System, EWIS), yazılım/işlevsel ve çoklu arızalar şeklinde sınıflandırılabilir. Sensörlerde sabit sapma, sürüklenme, ölçek hatası, sabitleme ve sinyal kaybı; eyleyicilerde etkinlik kaybı, sıkışma, doyum ve tepki bozulması; LRU'larda güç, işlemci, bellek ve giriş/çıkış sorunları görülebilir (Kıyak vd., 2011; Lopes vd., 2024).

Veri iletişim ağlarında mesaj kaybı, gecikme, zamanlama ve sıra anomalileri; EWIS'te açık/kısa devre, yalıtım bozulması, konektör problemi ve kesikli bağlantılar önemlidir. Özellikle

kesikli arızalar yalnızca belirli titreşim, sıcaklık veya yük koşullarında ortaya çıkabildiğinden uçuşta belirti verip yerdeki testte kaybolabilir. Bu özellik, NFF olaylarının önemli teknik nedenlerinden biridir (Han vd., 2019).

Arızaların zamansal davranışı da teşhis stratejisini etkiler. Kalıcı arızalar sürekli, geçici arızalar kısa süreli, kesikli arızalar ise düzensiz biçimde tekrar eder. Ayrıca bütünleşik aviyonikte tek bir fiziksel arıza farklı sistemlerde ikincil belirtiler oluşturabilir. Bu nedenle gözlenen bir BITE mesajı veya sensör anomalisi doğrudan kök neden olarak kabul edilmemelidir.

Model tabanlı FDI yöntemlerinde gerçek sistemden ölçülen çıktı $y(t)$ ile nominal $\hat{y}(t)$ karşılaştırılarak artık sinyal üretilir ve artık sinyal $r(t)$,

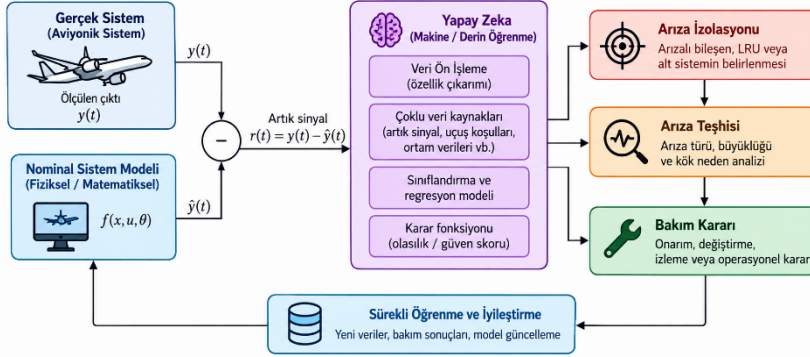
$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Sağlıklı durumda $r(t)$, model belirsizlikleri ve gürültü nedeniyle sıfır etrafında değişirken; arıza oluştuğunda ise belirgin biçimde sıfırdan uzaklaşır. En temel karar kuralında artığın büyüklüğü belirli bir eşik değeri J_{th} ile karşılaştırılır:

$$\begin{aligned} |r(t)| \leq J_{th} &\rightarrow Normal \\ |r(t)| > J_{th} &\rightarrow Arıza \end{aligned} \quad (2)$$

Eşik değeri çok düşük seçilirse yanlış alarm artabilir; çok yüksek seçildiğinde ise arızalar kaçırılabilir (Marzat vd., 2012; Zolghadri, 2012). Bu sebeple, uçuş koşullarına bağlı değişen gürültü düzeyi dikkate alınarak eşik değeri (J_{th}) uyarlanmalıdır. Yapay zekâ yöntemleri bu aşamada model tabanlı FDI yapısını tamamlayarak çoklu artık sinyalleri, uçuş koşullarını ve zamansal örüntüleri birlikte değerlendirebilir (Lu vd., 2016). Böylece fiziksel modelin sağladığı sistem bilgisi, veri güdümlü yöntemlerin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme yeteneğiyle

birleştirilerek daha güvenilir arıza tespiti, izolasyonu ve teşhisi gerçekleştirilebilir.



Şekil 2. Yapay zeka destekli değerlendirme ile aviyonik arıza tespiti, izolasyonu, teşhisi ve bakım karar süreci

Aviyonik arıza teşhisinde önemli sorunlardan biri, eğitim verisinde temsil edilmeyen bilinmeyen arızaların güvenilir biçimde ayırt edilmesidir. Geleneksel kapalı küme sınıflandırıcılar, yalnızca önceden tanımlanmış arıza sınıflarını dikkate aldığından, daha önce karşılaşılmamış bir arıza örneğini yüksek güvenle mevcut sınıflardan birine atayabilir. Bu durum, özellikle emniyet-kritik aviyonik sistemlerde hatalı teşhis ve uygun olmayan bakım kararları açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle gelişmiş teşhis sistemlerinin yalnızca “sağlıklı–arızalı” ayrımıyla sınırlı kalmaması; “sağlıklı–bilinen arıza–bilinmeyen arıza” ayrımını gerçekleştirebilecek bir karar yapısına sahip olması gerekmektedir. Anormallik tespiti, açık küme tanıma ve dağılım dışı tespit (Out-of-Distribution Detection, OOD) yöntemleri, modelin eğitim dağılımından önemli ölçüde farklı örnekleri belirleyerek bilinmeyen arızaların mevcut sınıflara hatalı biçimde atanmasını azaltmada önemli bir rol oynayabilir (Lopes vd., 2024).

Tablo 1. Aviyonik arıza grupları ve temel teşhis gereksinimleri

Arıza grubu	Örnekler	Başlıca veri	Temel güçlük
Sensör	Sapma, sürüklenme, donma	Zaman serisi, yedek sensör	Fiziksel olarak olası fakat yanlış ölçüm
Eyleyici	Etkinlik kaybı, sıkışma	Komut, konum, akım	Kapalı çevrim telafisi, az arıza verisi
LRU/elektronik	Güç, işlemci, I/O	BITE, olay ve elektriksel kayıtlar	Belirti-kök neden ayrımı
Veri ağı	Kayıp, gecikme, sıra/zamanlama	Mesaj içeriği ve zamanlama	LRU-ağ-EWIS ayrımı
EWIS	Açık/kısa devre, kesikli bağlantı	Elektriksel ölçüm, TDR/FDR	Yeniden üretilmeyen arıza
Bilinmeyen/çoklu	Yeni veya eşzamanlı arıza	Çok kaynaklı veri	Aşırı güven ve arıza yayılımı

3. GELENEKSEL BITE, MODEL TABANLI TEŞHİS VE VERİ KAYNAKLARI

BITE, aviyonik birimlerin çalışma durumunun izlenmesi ve olası arızalara ilişkin geçer/kalır bilgisi, arıza kodu veya şüpheli LRU gibi bakım çıktılarının üretilmesinde temel rol oynamaktadır. Merkezi bakım sistemleri ise farklı aviyonik birimlerden elde edilen BITE mesajlarını bütünleştirerek bakım personeline arızanın konumlandırılması açısından hızlı bir başlangıç noktası sağlamaktadır. Bununla birlikte BITE'in arıza izolasyon yeteneği, sistem tasarımı sırasında belirlenen test edilebilirlik düzeyi ve tanımlanmış arıza mantığıyla sınırlıdır. Özellikle ortak nedenli ve kesikli arızalar ile çevresel koşullara bağlı geçici olaylar, yanlış LRU değişimine veya test sırasında arızanın yeniden üretilmemesi nedeniyle NFF sonucuna yol açabilmektedir (Raza & Ulansky, 2018; Khan vd., 2014a, 2014b).

Model tabanlı teşhis yöntemleri, fiziksel veya matematiksel sistem modelinden elde edilen beklenen davranış ile gerçek sistem ölçümleri arasındaki tutarsızlıkların

değerlendirilmesine dayanmaktadır. Gözleyici tabanlı yöntemler, Kalman süzgeçleri ve parite ilişkileri bu yaklaşımın başlıca örnekleridir (Marzat vd., 2012; Patton & Chen, 1997). Hava veri sensörlerinin arıza tespit ve teşhisinde kullanılan uyarlamalı Kalman süzgeçleri, model tabanlı yöntemlerin havacılık uygulamalarındaki önemli örneklerinden biridir (Lu vd., 2016). Bununla birlikte yüksek doğrulukta sistem modeli geliştirme gereksinimi, model belirsizlikleri ve geniş uçuş zarfında değişen çalışma koşullarının temsil edilmesi, bu yöntemlerin temel sınırlamaları arasında yer almaktadır.

Yapay zekâ tabanlı FDI/FDD yöntemlerinin başarısı, kullanılan verinin niteliği ve arıza durumlarını temsil etme düzeyiyle doğrudan ilişkilidir. Aviyonik sistemlerde başlıca veri kaynakları; sensör ve uçuş zaman serileri, BITE ve merkezi bakım sistemi kayıtları, aviyonik veri yolu mesajları, EWIS ölçümleri, LRU durum bilgileri ve bakım kayıtlarından oluşmaktadır. Bu kaynakların birlikte değerlendirilmesi, tek bir sensör veya arıza koduna dayalı teşhisin ötesine geçilerek arızanın farklı sistemlerde oluşturduğu ilişkili belirtilerin belirlenmesine olanak sağlayabilir. Özellikle uçuş koşulları ile sensör davranışlarının birlikte ele alınması, veri güdümlü yöntemlerin aviyonik sensör arızalarının tespit ve izolasyonundaki etkinliğini artırmaktadır (Wang vd., 2022; Lopes vd., 2024).

Bununla birlikte emniyet-kritik aviyonik sistemlerde gerçek arıza olaylarının görece seyrek olması, yeterli ve dengeli eğitim verisinin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle benzetim, kontrollü arıza enjeksiyonu ve fiziksel modellerden üretilen sentetik veriler, yapay zekâ tabanlı teşhis yöntemlerinin geliştirilmesinde önemli veri kaynaklarıdır. Ancak sentetik olarak oluşturulan arızaların gerçek aviyonik sistem davranışını ve farklı uçuş koşullarını yeterli doğrulukta temsil etmesi gerekir. Ayrıca model değerlendirmesinde aynı uçuşa veya hava aracına ait

yüksek benzerlikteki zaman serilerinin eğitim ve test kümelerine birlikte dağılması önlenmelidir. Aksi durumda veri sızıntısı meydana gelebilir ve modelin gerçek genelleme yeteneğini yansıtmayan iyimser performans sonuçları elde edilebilir. Aviyonik sistemlere özgü açık erişimli ve gerçek arıza örnekleri içeren veri kümelerinin sınırlı olması da yöntemlerin ortak koşullar altında karşılaştırılmasını ve gerçek operasyonel ortamlara genellenebilirliğinin değerlendirilmesini güçleştiren önemli bir araştırma problemi olmaya devam etmektedir (Lopes vd., 2024; Costa vd., 2026).

4. YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİ VE AVİYONİK UYGULAMALARI

Yapay zekâ tabanlı arıza tespiti, izolasyonu ve teşhisinde kullanılacak yöntemin seçimi; veri türü, örnek sayısı, arızanın zamansal karakteri ve gerçek zamanlı çalışma gereksinimleriyle yakından ilişkilidir. Destek vektör makineleri (Support Vector Machines, SVM), rastgele orman (Random Forest, RF) ve XGBoost gibi geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri, özellikle önceden çıkarılmış özelliklerin veya BITE çıktılarının kullanıldığı küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde etkili çözümler sunmaktadır. Düşük hesaplama gereksinimleri bu yöntemleri gömülü uygulamalar açısından avantajlı hâle getirirken, karmaşık zamansal ilişkilerin modellenmesi genellikle uygun özellik mühendisliği gerektirmektedir. Örneğin Grehan vd. (2023), SVM tabanlı bir yaklaşımla uçuş kontrol eyleyicilerindeki etkinlik kaybı arızalarının tespitini incelemiştir.

Derin öğrenme yöntemleri ise çok değişkenli aviyonik zaman serilerinden ayırt edici özelliklerin doğrudan öğrenilmesine olanak sağlamaktadır. Evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) kısa süreli ve yerel örüntülerin belirlenmesinde etkiliyken; uzun kısa süreli bellek

(Long Short-Term Memory, LSTM), kapılı tekrarlayan birim (Gated Recurrent Unit, GRU) ve zamansal evrişim ağı (Temporal Convolutional Network, TCN) sürüklenme, kademeli değişim ve kesikli arıza gibi zamana bağlı davranışların modellenmesinde öne çıkmaktadır. Wang vd. (2022), uçuş testi sensörlerinden elde edilen çok kaynaklı verileri seyrek otomatik kodlayıcı ve CNN tabanlı bir yapı ile birleştirerek sensör arıza teşhisini gerçekleştirmiştir.

Dönüştürücü (Transformer) mimarileri, dikkat mekanizması sayesinde uzun zaman dizilerindeki uzak bağımlılıkların modellenmesine olanak sağlamakla birlikte, yüksek veri ve hesaplama gereksinimleri gerçek zamanlı aviyonik uygulamalarda dikkate alınmalıdır. Grafik sinir ağları (Graph Neural Networks, GNN) ise aviyonik sistemlerin ilişkisel yapısının doğrudan modellenmesi açısından farklı bir avantaj sunmaktadır. Sensör, LRU veya alt sistemlerin düğüm; fiziksel ya da işlevsel bağlantıların ise kenar olarak tanımlanması, bileşenler arasındaki bağımlılıkların ve arıza yayılımının teşhis sürecine dâhil edilmesini mümkün kılmaktadır. Li vd. (2025), GraphSAGE ve dikkat mekanizmasını birleştirerek sensörler arasındaki ilişkilerden arıza teşhisinde yararlanmıştır.

Etiketli arıza örneklerinin yetersiz olduğu durumlarda otomatik kodlayıcılar (Autoencoder, AE), tek sınıflı öğrenme, anormallik tespiti ve OOD yöntemleri önem kazanmaktadır. Bununla birlikte yalnızca sağlıklı verilerle öğrenilen bir model, eğitim sırasında karşılaşmadığı ancak normal olan yeni bir uçuş koşulunu da anomali olarak değerlendirebilir. Bu nedenle anormallik puanının tek başına bir arıza göstergesi olarak kullanılmasından ziyade uçuş koşulları, model belirsizliği ve fiziksel sistem bilgisiyle birlikte değerlendirilmesi daha güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır (Lopes vd., 2024).

Aviyonik uygulamalar açısından sensör ve eyleyici arızalarının teşhisi, yapay zekânın en yoğun araştırıldığı alanlardan biridir. Gerçek ticari uçuş verileri kullanılarak hücum açısı (AoA) ve pitot sensörlerindeki arızaların tespiti ve hatalı ölçümlerin yeniden oluşturulması gösterilmiştir (Kilic & Unal, 2022). Uçuş kontrol eyleyicilerinde ise SVM ve topluluk öğrenmesi yöntemleri etkinlik kaybı ve dengesiz arıza sınıfları gibi problemlere uygulanmıştır (Grehan vd., 2023; Jia vd., 2021). Benzer biçimde, aviyonik haberleşme ağlarında ARINC 429 mesajlarından elde edilen örüntülerin makine öğrenmesiyle değerlendirilmesi anomali tespiti açısından araştırılmaktadır (Ogural & Imre, 2026).

EWIS ve bütünleşik modüler aviyonik (Integrated Modular Avionics, IMA) yapıları ise daha karmaşık teşhis problemleri ortaya çıkarmaktadır. EWIS'teki kesikli bağlantıların uçuş sırasında ortaya çıkıp yerde tekrarlanamaması, BITE kayıtları ile elektriksel ölçümlerin ve bakım geçmişinin birlikte değerlendirilmesini önemli hâle getirmektedir. IMA mimarisinde ise işlemci, haberleşme ve diğer donanım kaynaklarının birden fazla aviyonik işlev tarafından paylaşılması nedeniyle teşhis problemi yalnızca arızalı LRU'nun belirlenmesinden ibaret değildir; ortak kaynaklardaki bir arızanın hangi işlevleri etkilediğinin de ortaya konulması gerekir. Çok ölçekli TCN ve dikkat mekanizmalarını kullanan aviyonik modül teşhis yaklaşımları, bu tür karmaşık bağımlılıkların veri güdümlü olarak modellenmesine yönelik güncel örnekler arasındadır (Du vd., 2024).

Tablo 2. Aviyonik FDI/FDD'de yapay zekâ yöntemlerinin kısa karşılaştırması

Yöntem	Uygun problem	Avantaj	Sınırlama
SVM / RF / XGBoost	Özellik ve BITE tablosu	Az/orta veride güçlü	Zaman bağlamı için özellik gerekir
CNN	Yerel zaman örüntüsü	Otomatik özellik çıkarımı	Uzun bağımlılık sınırlı
LSTM / GRU / TCN	Çok değişkenli zaman serisi	Zamansal arızalar	Eğitim ve ayar karmaşıklığı
Transformer	Uzun diziler	Uzak bağımlılıklar	Veri/hesaplama maliyeti
GNN	Sensör/LRU/topoloji	İlişkisel teşhis	Doğru grafik modeli gerekir
AE / OOD	Az etiket, bilinmeyen arıza	Yeni örüntüyü reddetme	Eşik ve kalibrasyon
Hibrit	Emniyet kritik FDI	Fizik + veri birlikte	Doğrulama karmaşıklığı

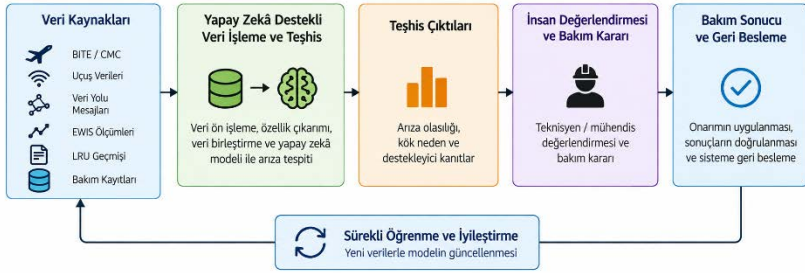
5. YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ BITE, NFF VE AKILLI BAKIM

NFF, operasyon sırasında arızalı olduğu değerlendirilen bir sistem veya bileşendeki arızanın bakım ya da atölye testleri sırasında yeniden üretilmemesi veya doğrulanamaması durumunu ifade etmektedir. NFF olayları; gereksiz LRU söküm ve değişimleri, tekrarlanan test işlemleri, artan bakım ve lojistik maliyetleri ile hava aracının kullanılabilirliğinde azalma gibi önemli operasyonel sonuçlara yol açabilmektedir (Khan vd., 2014a, 2014b). Kesikli elektriksel bağlantılar, çevresel veya operasyonel koşullara bağlı geçici arızalar, yanıltıcı BITE mesajları ve yetersiz test edilebilirlik, NFF oluşumunun başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Raza & Ulansky, 2018).

Yapay zekâ, BITE'in yerine geçen bağımsız bir teşhis mekanizmasından ziyade, BITE çıktıları ile bakım kararı arasındaki kanıt değerlendirme ve veri birleştirme sürecini destekleyen tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilebilir. BITE ve merkezi bakım kayıtlarının uçuş verileri, aviyonik veri yolu

mesajları, EWIS ölçümleri, LRU geçmişi ve önceki bakım kayıtlarıyla birlikte değerlendirilmesi, tek bir arıza koduna dayalı karar yerine çok kaynaklı bir teşhis yaklaşımının oluşturulmasına olanak sağlayabilir. NFF literatüründe de teşhis, test edilebilirlik, bilgi paylaşımı ve kök neden belirleme yeteneklerinin geliştirilmesi bu problemin azaltılmasında önemli unsurlar olarak gösterilmektedir (Khan vd., 2014a, 2014b). Güncel çalışmalar, farklı modellerden elde edilen teşhis bilgilerinin birleştirilmesinin NFF olaylarının azaltılmasında kullanılabileceğini göstermektedir (Liu vd., 2024). Böyle bir yaklaşım, olası kök nedenlerin önceliklendirilmesini ve bakım öncesinde uygulanabilecek doğrulama adımlarının belirlenmesini destekleyerek özellikle kesikli ve yeniden oluşturulması güç arızalarda gereksiz LRU değişimi riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilir.

NFF kayıtlarının yapay zekâ modellerinin eğitiminde doğrudan “sağlıklı” olarak etiketlenmesi de dikkatle ele alınmalıdır. Bir arızanın bakım veya atölye testi sırasında doğrulanamaması, ilgili sistemin kesin olarak sağlıklı olduğunu göstermemektedir; arıza kesikli olabilir, test koşullarında yeniden ortaya çıkmayabilir veya gözlenen belirtinin kök nedeni farklı bir bileşenden kaynaklanabilir. NFF literatüründe bu olayların elektronik, yazılım ve mekanik sistemlerde farklı kök nedenlerden kaynaklanabileceği ve geleneksel test süreçlerinin her zaman bu nedenleri ortaya çıkaramadığı belirtilmektedir (Khan vd., 2014b). Bu nedenle doğrulanmış sağlıklı, doğrulanmış arızalı ve belirsiz/NFF örneklerinin eğitim verisinde ayrı kategoriler olarak ele alınması, etiket belirsizliğinin modele aktarılmasını ve hatalı örneklerden öğrenme riskini azaltabilecek daha temkinli bir yaklaşımdır.



Şekil 3. Yapay zeka destekli BITE yönetimi ile akıllı bakım süreci

Akıllı bakım sistemlerinin çıktısı yalnızca tahmin edilen bir arıza sınıfıyla sınırlandırılmamalıdır. Teşhis sonucuyla birlikte olası kök nedenlerin öncelik sırası, kararın güven veya belirsizlik düzeyi, sonucu destekleyen sensör ve BITE kanıtları ile önerilen doğrulama işlemlerinin bakım personeline sunulması, yapay zekânın kanıta dayalı bakım karar desteği sağlayan bir araç olarak kullanılmasına olanak tanır. Bu yaklaşım, havacılıkta yapay zekâ uygulamalarında insan–yapay zekâ etkileşimi, açıklanabilirlik ve insan gözetimini öne çıkaran güncel güvenilir yapay zekâ yaklaşımıyla da uyumludur (EASA, 2024). Bu nedenle nihai bakım kararının yetkili teknik personelin değerlendirmesi altında tutulması; bakım ve doğrulama sonuçlarının ise model performansının izlenmesi ve kontrollü güncellenmesi amacıyla geri beslenmesi, güvenilir ve insan merkezli bir akıllı bakım mimarisinin temel unsurları arasında değerlendirilmelidir.

6. GÜVENİLİR YAPAY ZEKÂ VE GELECEK AKILLI AVİYONİK BAKIM MİMARİSİ

Emniyet-kritik aviyonik uygulamalarda bir yapay zekâ modelinin yüksek sınıflandırma veya tahmin doğruluğuna ulaşması, tek başına güvenilir kullanım için yeterli değildir. Modelin kararlarının anlaşılabilir olması, farklı operasyon

koşullarındaki davranışının öngörülebilmesi ve sonuçların uygun güvence süreçleri içerisinde değerlendirilebilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence, XAI), teşhis sonucunun hangi sensörler, zaman aralıkları, BITE kayıtları veya diğer sistem değişkenleriyle ilişkili olduğunu ortaya koyarak bakım personelinin model çıktısını değerlendirmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte açıklamanın yalnızca matematiksel özellik önemine indirgenmemesi; elde edilen açıklamaların sistem mimarisi, fiziksel çalışma prensipleri ve bilinen arıza mekanizmalarıyla tutarlılığının da değerlendirilmesi önemlidir. EASA'nın havacılıkta yapay zekâ yaklaşımında açıklanabilirlik, öğrenme güvencesi ve insan-yapay zekâ etkileşimi güvenilir yapay zekâ uygulamalarının temel unsurları arasında değerlendirilmektedir (EASA, 2024).

Belirsizlik yönetimi, özellikle eğitim verisinde yeterince temsil edilmeyen çalışma koşulları ve bilinmeyen arızalar açısından güvenilir teşhisin diğer önemli bileşenidir. Uçuş koşullarındaki değişimler, sensör gürültüsü, model belirsizlikleri ve eksik arıza örnekleri teşhis çıktısının güvenilirliğini etkileyebilmektedir (Zhou vd., 2024). Bu nedenle düşük güven veya OOD bir örnek tespit edildiğinde sistemin girdiyi mevcut arıza sınıflarından birine zorunlu olarak ataması yerine, kararı ertelemesi, ek test önermesi veya uzman değerlendirmesine yönlendirmesi daha güvenli bir yaklaşım sunmaktadır. Bu doğrultuda güvenilir bir teşhis çıktısı yalnızca tahmin edilen arıza sınıfını değil; arıza sınıfı, güven düzeyi, belirsizlik, bilinen/bilinmeyen durum ve destekleyici kanıt bileşenlerini birlikte içermelidir.

Gelecekteki akıllı aviyonik bakım sistemlerinde multimodal veri birleştirme de önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilebilir. Sensör zaman serileri, BITE ve merkezi bakım sistemi kayıtları, aviyonik veri yolu mesajları, EWIS

ölçümleri ve bakım metinlerinin ortak bir teşhis bağlamında değerlendirilmesi, tek bir veri kaynağından elde edilemeyen arıza ilişkilerinin ortaya çıkarılmasını sağlayabilir. Büyük dil modelleri (Large Language Models, LLM) ise bakım el kitapları, arıza izolasyon prosedürleri ve geçmiş bakım kayıtları gibi metin tabanlı kaynaklara erişimi kolaylaştırma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte emniyet-kritik bakım uygulamalarında LLM'lerin bağımsız bakım karar mekanizması olarak kullanılmasından ziyade, doğrulanmış teknik kaynaklara dayalı bilgi erişimi, özetleme ve açıklama sağlayan insan destekli bir arayüz olarak konumlandırılması daha uygun bir yaklaşım olacaktır. Bu insan merkezli yaklaşım, EASA'nın Level 1 insan desteği ve Level 2 insan-yapay zekâ ekip çalışmasına dayanan çerçevesiyle de uyumludur (EASA, 2024).

Geleceğin akıllı aviyonik bakım mimarisi, izleme ve veri toplama, arıza tespiti, arıza izolasyonu, arıza teşhisi, kök neden analizi, gerektiğinde prognostik değerlendirme, bakım karar desteği ve insan merkezli akıllı bakım yardımcısı aşamalarından oluşan bütünleşik bir yapı olarak ele alınabilir. Bu yaklaşım, geleneksel BITE işlevlerini çok kaynaklı veri analizi ve yapay zekâ destekli teşhisle genişleterek elde edilen bilgilerin bakım kararına dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Açıklanabilirlik, belirsizlik/OOD yönetimi, veri ve model güvenilirliği ile insan denetimi ise tüm süreci destekleyen yatay güvence mekanizmalarıdır. Nihai bakım kararı yetkili personelde kalırken bakım sonuçlarının sisteme geri beslenmesi, teşhis performansının izlenmesine ve kontrollü biçimde geliştirilmesine olanak sağlar. Burada tanımlanan yapı bir sertifikasyon standardı değil, akıllı aviyonik bakım için önerilen kavramsal bir mimaridir.

Bu tür sistemlerin gerçek operasyonel kullanıma aktarılabilmesi için performansın yalnızca doğruluk, kesinlik veya F1 skoru gibi makine öğrenmesi ölçütleriyle

değerlendirilmesi yeterli değildir. Modellerin farklı hava araçları, uçuşlar, çevresel koşullar ve operasyon profilleri altında genelleme yeteneği sınanmalı; yanlış alarm oranı, kaçırılan arıza oranı, tespit gecikmesi, doğru LRU izolasyonu, NFF oranı, gereksiz LRU sökümü ve arıza giderme süresi gibi bakım açısından anlamlı göstergeler de değerlendirmeye dâhil edilmelidir. Gömülü aviyonik uygulamalarda hesaplama gecikmesi, bellek gereksinimi ve kaynak kullanımı da sistem performansının bir parçası olarak ele alınmalıdır. Emniyet güvencesi açısından ise veri kaynağından model geliştirme ve doğrulamaya kadar yaşam döngüsünün izlenebilir olması ve YZ bileşeninin mevcut havacılık emniyet süreçleriyle bütünleştirilmesi önem taşımaktadır. EASA ve FAA'nın güncel yaklaşımları da havacılıkta yapay zekanın yalnızca algoritmik performans üzerinden değil, sistem ve yaşam döngüsü düzeyinde güvence altına alınması gereğine işaret etmektedir (EASA, 2024; FAA, 2024).

Gelecekteki araştırmalar açısından fizik bilgili hibrit modeller, kendinden denetimli ve az etiketli öğrenme, grafik tabanlı arıza yayılım analizi, belirsizlik farkındalıklı teşhis, dijital ikizler, çok kipli veri birleştirme ve filo düzeyinde öğrenme öne çıkan araştırma yönleri olarak değerlendirilebilir. Özellikle fiziksel sistem bilgisinin veri güdümlü modellerle bütünleştirilmesi, sınırlı arıza verisi altında daha fiziksel olarak tutarlı teşhis sonuçlarının elde edilmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte model güncellemelerinin emniyet-kritik uygulamalarda kontrolsüz ve sürekli bir çevrim olarak değil, performansı izlenen, doğrulanan ve değişiklikleri izlenebilir biçimde yönetilen bir yaşam döngüsü içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla gelecek çalışmaların temel hedefi yalnızca daha karmaşık veya daha yüksek doğruluklu yapay zekâ modelleri geliştirmek değil, gerçek aviyonik bakım süreçlerine ölçülebilir katkı sağlayan,

belirsizliğini ifade edebilen, açıklanabilir ve insan denetimli karar destek sistemleri geliştirmek olmalıdır.

7. SONUÇ

Aviyonik sistemlerde arıza tespiti, izolasyonu ve teşhisi (FDI/FDD), geleneksel yerleşik test sistemleri (BITE) ve model tabanlı yaklaşımlardan, çok kaynaklı verileri değerlendirebilen yapay zekâ destekli ve hibrit teşhis yapılarına doğru gelişmektedir. Bununla birlikte bu dönüşüm, mevcut BITE ve fiziksel model tabanlı teşhis altyapısının yerini bütünüyle veri güdümlü yöntemlerin alması şeklinde değerlendirilmemelidir. Yapay zekânın temel katkısı; BITE çıktıları, fiziksel sistem bilgisi, operasyonel veriler ve bakım geçmişi arasındaki karmaşık ilişkileri değerlendirerek arıza tespitinin güvenilirliğini artırmak, arıza kaynağının izolasyonunu iyileştirmek ve kök neden analizini desteklemektir.

Mevcut çalışmalar özellikle sensör ve eyleyici arızalarının tespit ve teşhisinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık aviyonik veri iletişim ağları, EWIS, IMA mimarileri, kesikli ve çoklu arızalar, bilinmeyen arızalar ve NFF olayları gibi daha karmaşık problemlerde gerçek operasyon koşullarındaki doğrulamalar henüz daha sınırlıdır. Bu nedenle gelecekte geliştirilecek yöntemlerin yalnızca kontrollü veya benzetim tabanlı veri kümelerinde yüksek doğruluk sağlaması değil; farklı hava araçları, uçuş koşulları ve gerçek bakım senaryoları altında genellenebilir ve güvenilir sonuçlar üretmesi önem taşımaktadır.

Geleceğin akıllı aviyonik bakım yaklaşımında BITE ile yapay zekâ birbirinin alternatifini değil, birbirini tamamlayan bileşenler olarak ele alınmalıdır. Güvenilir bir sistemin yalnızca arızanın varlığını belirlemesi yeterli değildir; arıza kaynağını

izole etmesi, olası kök nedenleri önceliklendirmesi, kararın güven ve belirsizlik düzeyini ortaya koyması, sonucu destekleyen kanıtları sunması ve gerekli doğrulama işlemlerini önermesi beklenmektedir. Özellikle bilinmeyen veya düşük güvenli durumlarda sistemin kesin bir karar üretmek yerine ek test veya uzman değerlendirmesine yönlendirmesi, emniyet-kritik aviyonik uygulamalar açısından önemlidir.

Sonuç olarak yapay zekânın aviyonik bakım açısından temel değeri, daha karmaşık bir algoritma geliştirilmesinden çok, mevcut teşhis bilgisini daha etkin kullanarak güvenilir ve kanıta dayalı bakım karar desteği sağlamasında yatmaktadır. BITE, fiziksel modeller ve çok kaynaklı operasyonel verilerin açıklanabilir ve belirsizlik farkındalıklı yapay zekâ yöntemleriyle bütünleştirilmesi; yanlış alarmların ve NFF olaylarının azaltılması, gereksiz LRU sökümünün önlenmesi, arıza giderme süresinin kısaltılması ve hava aracı kullanılabilirliğinin artırılması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte nihai bakım kararının yetkili teknik personelde kalması, yapay zekânın ise insan merkezli, açıklanabilir ve güvenilir bir karar destek bileşeni olarak konumlandırılması, bu teknolojilerin gerçek aviyonik bakım ortamlarına güvenli biçimde aktarılmasının temel koşullarından biridir.

KAYNAKÇA

- Chen, H., Yan, J., & Fu, W. (2025). Two-layer fault diagnosis model of aircraft based on LSTM. *Aerospace Science and Technology*, 158, 109756.
- Costa, J., Farinha, J. T., Raposo, H., Marques Cardoso, A. J., Carmo, A., Gonçalves, P., & Farto, J. (2026). A systematic literature review on AI-driven predictive maintenance and fault detection in aircraft systems. *Applied Sciences*, 16(7), 3381.
- Du, Q., Sheng, M., Yu, L., Zhou, Z., Tian, L., & He, S. (2024). Avionics module fault diagnosis algorithm based on hybrid attention adaptive multi-scale temporal convolution network. *Entropy*, 26(7), 550.
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2024). Artificial Intelligence Concept Paper Issue 2: Guidance for Level 1 & 2 machine-learning applications. EASA
- Federal Aviation Administration (FAA). (2024). Roadmap for Artificial Intelligence Safety Assurance, Version I. Federal Aviation Administration.
- Grehan, J., Ignatyev, D., & Zolotas, A. (2023). Fault detection in aircraft flight control actuators using support vector machines. *Machines*, 11(2), 211.
- Han, C., Park, S., & Lee, H. (2019). Intermittent failure in electrical interconnection of avionics system. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 61–71.
- Jia, Z., Liu, Z., & Cai, Y. (2021). A novel fault diagnosis method for aircraft actuator based on ensemble model. *Measurement*, 176, 109235.
- Khan, S., Phillips, P., Jennions, I., & Hockley, C. (2014a). No Fault Found events in maintenance engineering Part 1:

- Current trends, implications and organizational practices. Reliability Engineering & System Safety, 123, 183–195.
- Khan, S., Phillips, P., Hockley, C., & Jennions, I. (2014b). No Fault Found events in maintenance engineering Part 2: Root causes, technical developments and future research. Reliability Engineering & System Safety, 123, 196–208.
- Kilic, U., & Unal, G. (2022). Sensor fault detection and reconstruction system for commercial aircrafts. The Aeronautical Journal, 126(1299), 889–905.
- Kiyak, E., Kahvecioglu, A., & Caliskan, F. (2011). Aircraft sensor and actuator fault detection, isolation, and accommodation. Journal of Aerospace Engineering, 24(1), 46–58.
- Li, Z., Ma, J., Fan, R., Zhao, Y., Ai, J., & Dong, Y. (2025). Aircraft sensor fault diagnosis based on GraphSage and attention mechanism. Sensors, 25(3), 809.
- Liu, Z., Kong, X., Chen, Y., Wang, Z., Jia, H., & Al-Rubaye, S. (2024). Mitigating No Fault Found phenomena through ensemble learning: A mixture of experts approach. 2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1145–1150.
- Lopes, L. L., Travé-Massuyès, L., Jauberthie, C., & Alcalay, G. (2024). A review of fault diagnosis techniques applied to aircraft air data sensors. In 35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024) (Vol. 125, pp. 3:1–3:20).
- Lu, P., van Eykeren, L., van Kampen, E.-J., de Visser, C. C., & Chu, Q. P. (2016). Adaptive three-step Kalman filter for air data sensor fault detection and diagnosis. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 39(3), 590–604.

- Marzat, J., Piet-Lahanier, H., Damongeot, F., & Walter, E. (2012). Model-based fault diagnosis for aerospace systems: A survey. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 226(10), 1329–1360.
- Ogural, M., & Imre, K. M. (2026). Machine learning based anomaly detection on ARINC-429 data bus: A simulation-based approach. In *2026 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*.
- Patton, R. J., & Chen, J. (1997). Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications. *Control Engineering Practice*, 5(5), 671–682.
- Raza, A., & Ulansky, V. (2018). Modelling of false alarms and intermittent faults and their impact on the maintenance cost of digital avionics. *Procedia Manufacturing*, 16, 107–114.
- Wang, H., Xu, D., Wen, X., Song, J., & Li, L. (2022). Flight test sensor fault diagnosis based on data-fusion and machine learning method. *IEEE Access*, 10, 120013–120022.
- Zhou, K., Lu, N., Jiang, B., & Meng, X. (2024). Review on uncertainty analysis and information fusion diagnosis of aircraft control system. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 35(5), 1245–1263.
- Zolghadri, A. (2012). Advanced model-based FDIR techniques for aerospace systems: Today challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences*, 53, 18–29.
- Zolghadri, A. (2024). A review of fault management issues in aircraft systems: Current status and future directions. *Progress in Aerospace Sciences*, 147, 101008.

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN BAĞLANTI ELEMANLARI

Özkan TOKER¹

Cihat AYDIN²

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları, son yıllarda savunma, güvenlik, haritalama, tarım, afet yönetimi, lojistik, çevresel gözlem ve bilimsel araştırma gibi farklı uygulama alanlarında kullanılan gelişmiş havacılık sistemleri hâline gelmiştir. Bu sistemler, yalnızca havada hareket eden bir platformdan oluşmamakta, görev başarısını sağlayan çok sayıda alt bileşenin birlikte çalışmasıyla işlev kazanmaktadır. Gövde, kanat, iniş takımı, tahrik sistemi, kontrol yüzeyleri, aviyonik birimler, faydalı yük, haberleşme altyapısı ve yer kontrol istasyonu, İHA sistem mimarisini meydana getiren temel unsurlar arasında yer almaktadır. (Austin, 2010; Gundlach, 2014).

İHA’larda yapısal tasarımın öncelikli hedeflerinden biri, hava aracının görevini güvenli biçimde yerine getirmesini sağlarken yapısal ağırlığı olabildiğince düşük seviyede tutmaktır. Özellikle küçük ve orta ölçekli İHA sistemlerinde ağırlık artışı, uçuş süresi, faydalı yük kapasitesi, enerji tüketimi, manevra kabiliyeti ve operasyonel verimlilik üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu durum, İHA yapısını oluşturan her parçanın ve her bağlantı noktasının mühendislik açısından dikkatle

¹ Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri, ORCID: 0009-0002-7243-4863.

² Profesör Doktor, Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Bakım Onarım Bölümü, ORCID: 0001-0000-9997-6326.

değerlendirilmesini gerektirmektedir. Gövde, kanat, kuyruk takımı, motor bağlantı bölgeleri, iniş takımı ve faydalı yük taşıyıcıları gibi alanlarda kullanılan yapısal unsurlar; hafiflik, dayanım, rijitlik, yorulma ömrü, bakım kolaylığı, üretilebilirlik ve montaj güvenliği bakımından ele alınmalıdır. Bu unsurlar içinde bağlantı elemanları, çoğu zaman küçük boyutlu parçalar olarak görülmesine rağmen, yük aktarımının sürekliliği ve yapısal bütünlüğün korunması açısından kritik bir işlev üstlenmektedir.

Bağlantı elemanları, iki veya daha fazla parçanın belirli bir yük aktarım düzeni içinde bir araya getirilmesini sağlayan mekanik ya da kimyasal bağlantı çözümleri olarak tanımlanmaktadır. Cıvata, somun, vida, perçin, pim, rondela, kilitleme elemanları, yapıştırıcı bağlantılar ve hibrit bağlantılar bu kapsamda değerlendirilmektedir. İHA yapılarında bu elemanlar; kanat-gövde birleşimleri, motor taşıyıcıları, iniş takımı bağlantıları, elektronik modül montajları, sensör yuvaları, batarya bölmeleri, faydalı yük taşıyıcıları ve bakım amacıyla açılıp kapatılabilen kapak sistemleri gibi farklı bölgelerde kullanılmaktadır. Dolayısıyla bağlantı elemanı seçimi, yalnızca montaj kolaylığı ya da üretim pratikliği üzerinden değerlendirilemeyecek kadar geniş bir mühendislik anlamı taşımaktadır. Bu seçim, uçuş emniyeti, yapısal güvenilirlik, servis ömrü ve bakım süreçleri üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır.

Havacılık yapılarında bağlantı noktaları, gerilme yığılmalarının, yorulma hasarlarının ve çatlak başlangıçlarının meydana gelebileceği hassas bölgeler olarak kabul edilmektedir. İHA’larda bu durum, aracın hafif yapısal tasarıma sahip olması ve uçuş sırasında değişken yüklere maruz kalması nedeniyle daha dikkatli ele alınmalıdır. Özellikle kompozit malzemelerin yaygın biçimde kullanılmaya başlanması, bağlantı tasarımını metalik yapılara kıyasla daha karmaşık hâle getirmiştir. Camanho ve Matthews (1997), fiber takviyeli polimer kompozitlerde mekanik

bağlantıların dayanımının; bağlantı geometrisi, delik çapı, kenar mesafesi, katman dizilimi, sürtünme, boşluk ve üç boyutlu gerilme durumu gibi birçok parametreden etkilendiğini belirtmektedir. Bu durum, İHA’larda kullanılan bağlantı elemanlarının yalnızca standart makine elemanları olarak seçilmemesi gerektiğini, aksine aracın malzeme yapısı, görev profili ve yükleme koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

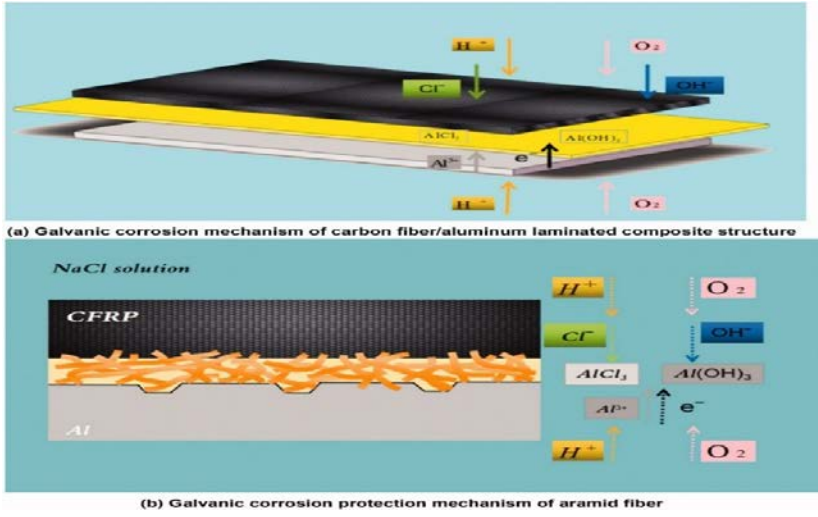
Kompozit malzemelerin İHA yapılarında tercih edilmesinin temel nedenleri arasında yüksek özgül dayanım, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik yer almaktadır. Bununla birlikte kompozit yapılarda mekanik bağlantı uygulanması, metalik yapılardan farklı hasar mekanizmalarını gündeme getirmektedir. Bağlantı deliği çevresinde lif kırılması, matris çatlağı, tabakalar arası ayrılma, ezilme, net kesit kopması ve kesme hasarı gibi sorunlar, bağlantı bölgesinin taşıma kapasitesini sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle kompozit yapılarda bağlantı tasarımı, yalnızca bağlantı elemanının dayanımına göre şekillendirilmemeli, delik açma işleminin malzeme üzerindeki etkileri, yük aktarım biçimi ve bağlantı çevresindeki gerilme dağılımı da dikkate alınmalıdır.

Mekanik bağlantılar, özellikle bakım, onarım ve sökülebilirlik gerektiren İHA bileşenlerinde işlevsel üstünlük sağlamaktadır. Cıvatalı ve vidalı bağlantılar, hasarlı parçaların değiştirilmesine, elektronik ekipmanlara erişim sağlanmasına ve görev ekipmanlarının modüler biçimde kullanılmasına imkân tanımaktadır. İHA’lar uçuş sırasında motor titreşimleri, aerodinamik yükler, iniş-kalkış darbeleri ve görev koşullarına bağlı değişken yükler altında çalıştığından, bağlantı elemanlarının dinamik davranışı tasarım sürecinde ayrı bir değerlendirme alanı oluşturmaktadır. İbrahim ve Pettit (2005), cıvatalı bağlantıların dinamik davranışının temas yüzeyi, sürtünme, ön yük, imalat toleransları ve doğrusal olmayan

etkileşimler nedeniyle karmaşık olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle İHA bağlantılarında gevşemeyi önleyici somunlar, kilitleme pulları, emniyet telleri, dış kilitleyiciler ve uygun torklama işlemleri tasarımın tamamlayıcı unsurları olarak ele alınmalıdır.

Yapıştırıcı bağlantılar ve hibrit bağlantılar da İHA yapılarında giderek daha fazla değerlendirilen bağlantı çözümleri arasında yer almaktadır. Özellikle kompozit gövde ve kanat yapılarında yapıştırıcı bağlantılar, yükün daha geniş bir yüzeye yayılmasına katkıda bulunmakta ve delik açma işleminden kaynaklanan gerilme yığılmalarını azaltabilmektedir. Bu bağlantı türleri, aerodinamik yüzeylerde daha düzgün dış geometri elde edilmesi açısından da avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte yapıştırıcı bağlantıların güvenilirliği; yüzey hazırlığı, bağ hattı kalitesi, kurlama koşulları, çevresel etkiler, kalite kontrol süreçleri ve tahribatsız muayene uygulamalarıyla doğrudan ilişkilidir.

İHA’larda bağlantı elemanları açısından dikkate alınması gereken bir diğer konu malzeme uyumluluğudur. Alüminyum alaşımları, paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları ve kompozit malzemeler aynı yapıda birlikte kullanılabilirdiğinden, farklı malzemeler arasında galvanik korozyon riski oluşabilmektedir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin metal bağlantı elemanlarıyla temas ettiği bölgelerde uygun yalıtım, kaplama veya ara malzeme kullanılmadığında bağlantı bölgesinin uzun dönem dayanımı olumsuz etkilenebilmektedir. Song, Zhang, Chen ve Zheng (2021), karbon fiber takviyeli polimerlerin temas ettiği metallerde galvanik korozyon riskinin önemli bir mühendislik problemi olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle bağlantı elemanı seçiminde yalnızca mekanik dayanım ölçütleriyle hareket edilmemeli, elektrokimyasal uyumluluk ve çevresel dayanım da dikkate alınmalıdır.



Şekil 1. Galvanik korozyon oluşumu (Wang et al., 2023)

2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA GENEL BAKIŞ

2.1. İnsansız Hava Aracı (İHA) Tanımı

İHA kavramı, çağdaş havacılık terminolojisi içinde insanlı uçuş sistemlerinden ayrılan özgül bir hava aracı türünü ifade etmektedir. Küresel Hava Trafik Yönetimi Operasyonel Konsepti Doc. 9854 kapsamında bu araçlar, Şikago Konvansiyonu'nun 8. maddesiyle ilişkilendirilen ve bünyesinde pilot barındırmadan uçuş gerçekleştiren hava araçları olarak tanımlanmaktadır. En yalın çerçevede İHA, üzerinde pilot bulunmaksızın hareket eden, GPS denetimi altında yönlendirilebilen ve belirli görevleri otomatik biçimde yerine getirebilen hava aracı niteliği taşımaktadır (Çetinkaya ve Koç, 2023). Bu yönüyle İHA, uçuş eylemini doğrudan insanlı kokpit yönetimiyle yürütmeyen, komuta, kontrol ve seyrüsefer süreçlerini farklı teknik düzenekler aracılığıyla gerçekleştiren bir sistem olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzde İHA'lar, yer istasyonunda bulunan bir pilot ya da operatör tarafından kumanda edilerek kullanılmakta yahut önceden hazırlanan uçuş planının sisteme yüklenmesiyle belirlenen güzergâh üzerinde otomatik uçuş icra etmektedir. Bu yapı, İHA'ların yalnızca uçan bir araç şeklinde kavranmasını sınırlı kılmakta, kavramın teknik donanım, kontrol sistemi, haberleşme bağlantısı ve görev yüküyle birlikte düşünülmesini gerektirmektedir (Elmas ve Alkan, 2023).

2.2. İnsansız Hava Aracı (İHA) Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri

İnsansız hava araçları, ilk dönemlerde ağırlıklı olarak askeri görevler ve gözetleme faaliyetleri kapsamında değerlendirilmiş, teknolojik gelişmeler, maliyetlerin düşmesi ve erişilebilirliğin artmasıyla birlikte sivil, bilimsel ve mühendislik temelli uygulamalarda yaygın bir kullanım alanı kazanmıştır (Libelium, 2015). Bu dönüşüm, söz konusu araçların yalnızca uçuş kabiliyetine sahip platformlar olarak ele alınmasını sınırlamakta, taşıdıkları sensörler ve faydalı yükler aracılığıyla veri üreten sistemler şeklinde değerlendirilmesini gerektirmektedir. İnsansız hava araçları, haritacılık, ziraat, madencilik, inşaat, doğal afet izleme, meteoroloji, arkeoloji ve benzeri alanlarda farklı görevleri yerine getirebilen teknik donanımlara sahip hava platformları olarak kullanılmaktadır. İnsanlı hava araçları ve uydu görüntüleriyle karşılaştırıldığında, düşük maliyetli, hızlı, hassas ve analitik veri üretme kapasitesiyle dikkat çekmektedir.

İnsansız hava araçlarının kullanım alanları, taşıdıkları faydalı yüklerin niteliğiyle doğrudan ilişkilendirilmektedir. Faydalı yük kavramı, aracın uçuş amacı doğrultusunda üzerinde bulundurduğu ve görev icrasında kullanılan ekipmanları ifade etmektedir (Borky, 1997).

İnsansız hava araçlarında en sık karşılaşılan bilgi toplayıcı faydalı yükler elektro-optik sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemler, görevin niteliğine göre görünür dalga boyunda çalışan yüksek çözünürlüklü kameralar, termal kameralar, gece görüş kameraları, kızılötesi kameralar, multispektral kameralar, hiperspektral kameralar, oblik kameralar, optik yakınlaştırma yapabilen kameralar, USB web kameraları ve analog mini kameralar şeklinde çeşitlenmektedir. Bu sensörler, görüntüleme, ölçüm, sınıflandırma, izleme ve analiz süreçlerinde kullanılmaktadır. Özellikle haritalama, tarımsal analiz, afet değerlendirmesi ve endüstriyel denetim gibi uygulamalarda bu sensörlerden elde edilen veriler bilgisayar yazılımları aracılığıyla işlenmekte ve anlamlı çıktılara dönüştürülmektedir (Kusak vd., 2021).



Şekil 2. ASELSAN tarafından geliştirilen elektro-optik sistem (CATS-Common Aperture Targeting System) (ASELSAN, 2022)

Elektro-optik sistemlerin yanında, göreve özgü bilgi toplayıcı sensörler de insansız hava aracı uygulamalarında geniş yer tutmaktadır. Lazer mesafe bulucular, LİDAR sensörleri, rüzgâr hızı ölçerler, sentetik açıklıklı radar sistemleri, gaz seviyesi ölçüm sensörleri, meteorolojik sensörler, pH ölçüm sensörleri, piranometreler, gürültü ölçüm sensörleri, anemometreler ve elektromanyetik kuvvet sensörleri bu kapsamda değerlendirilmektedir. (Libelium, 2015). Meteorolojik

sensörler ise sıcaklık, nem ve basınç gibi çevresel değişkenleri ölçmektedir.

İnsansız hava araçları, harita mühendisliği uygulamalarında ortofoto üretimi, sayısal yükseklik modeli üretimi, sayısal arazi modeli üretimi, sayısal yüzey modeli üretimi, tematik harita üretimi, yüksek yoğunluklu nokta bulutu oluşturma, üç boyutlu haritalama, oblik haritalama, multispektral haritalama, hiperspektral haritalama, koridor haritalama ve coğrafi bilgi sistemleri için altlık harita oluşturma süreçlerinde kullanılmaktadır. Uydu görüntülerine kıyasla daha yüksek mekânsal, radyometrik ve spektral çözünürlük elde edilmesi, insansız hava araçlarının haritalama çalışmalarında tercih edilmesinin temel gerekçeleri arasında yer almaktadır (Borky, 1997).

Tarımsal uygulamalarda insansız hava araçları, hassas tarım yaklaşımı çerçevesinde bitki sağlığı izleme, indeks haritası oluşturma, su stresi analizi, sulama planlaması, toprak nem ve sıcaklık ölçümü, klorofil yoğunluğu belirleme, nitrojen yoğunluğu değerlendirme, mineral eksikliği tespiti, hastalık tespiti, rekolte tahmini, bitki sınıflandırma ve bitki gelişimi izleme faaliyetlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 3. Haritalama ve ölçümde İHA kullanımı (İHA Kullanım Alanları - Shark Aviation, t.y.)

Multispektral ve hiperspektral sensörler, bitki örtüsü yoğunluğu, klorofil düzeyi, su stresi ve toprak durumu gibi değişkenlerin analiz edilmesinde tercih edilmektedir. Bu sensörlerden elde edilen farklı bant görüntüleri, normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi gibi indeks haritalarının oluşturulmasına temel oluşturmaktadır (Kusak vd., 2021).



Şekil 4. Tarım sektöründe dron kullanımı (İHA Kullanım Alanları - Shark Aviation, t.y.)

Doğal afet yönetimi kapsamında insansız hava araçları, afet öncesi, afet anı ve afet sonrası süreçlerde veri toplama aracı olarak değerlendirilmektedir. Heyelan riski hesaplama, heyelan sonrası hasar tespiti, sel tahmini, sel yayılım analizi, yangın izleme, yangın yayılım tahmini, yangın sonrası hasar tespiti, deprem sonrası hasar tespiti, doğal afet bölgesi anons ve yönlendirme faaliyetleri ile arama kurtarma çalışmaları bu kullanım alanları arasında yer almaktadır. Termal kameralar, yüksek çözünürlüklü kameralar, koordinat belirleme sistemleri ve çeşitli algılama sensörleri, afet bölgelerinde hızlı veri üretimi açısından işlevsel bir yapı oluşturmaktadır (Kusak vd., 2021).



Şekil 5. İHA ile elde edilen görüntüler üzerinde YOLOv3 derin öğrenme algoritmaları kullanılarak yangın bölgesi tespit edilmesi (Jiao vd., 2019)

Endüstriyel uygulamalarda insansız hava araçları, altyapı izleme, petrol ve gaz boru hattı denetimi, yüksek gerilim hattı izleme, rüzgâr türbini denetimi, solar panel kontrolü, gaz sızıntısı ölçümü ve envanter sayımı gibi görevlerde kullanılmaktadır. Termal kameralar, gaz sensörleri, lazer tabanlı metan algılama sistemleri, görünür ışık kameraları ve görüntü işleme temelli analizler bu alanlarda yaygın biçimde değerlendirilmektedir. (Libelium, 2015).



Şekil 6. Enerji ve endüstriyel tesis denetimlerinde İHA kullanımı (İHA Kullanım Alanları - Shark Aviation, t.y.)

Arkeoloji, inşaat, çevre, lojistik, ticari çekim, emniyet, güvenlik, adli inceleme, hobi, spor ve askeri uygulamalar da insansız hava araçlarının kullanım sahaları içinde yer almaktadır. Arkeolojik alanların haritalanması, tarihi eserlerin üç boyutlu modellenmesi ve röleve çalışmalarında fotogrametrik sensörlerden yararlanılmaktadır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında çatı yalıtım denetimi, yapı hasar tespiti, köprü ve yol projelerinin izlenmesi ile hacim hesaplamaları yapılmaktadır. Çevre ve doğa uygulamalarında yaban hayatı, endemik türler ve atmosferik değişkenler izlenmektedir (Borky, 1997). Bu çeşitlilik, insansız hava araçlarının sensör teknolojileriyle bütünleştiğinde yalnızca görüntü alan araçlar olmaktan çıkarak farklı disiplinlerde veri toplama, analiz ve karar üretme süreçlerinin etkin bileşenleri hâline geldiğini göstermektedir.

2.3. İnsansız Hava Aracı (İHA) Sistem Tasarımı

İnsansız hava aracı sistem tasarımı, hava aracının tek başına uçuş kabiliyetinden ziyade yer kontrol birimi, haberleşme donanımları, uçuş kontrol yapısı, güç dağıtımı, algılayıcılar, görev bilgisayarı ve faydalı yük bileşenlerinin birlikte çalışmasına dayanan bütünleşik bir mühendislik düzeni olarak ele alınmaktadır. Bu sistem yaklaşımında temel yapı, yer kontrol istasyonu ile hava aracı arasında kurulan kablosuz iletişim üzerinden biçimlenmektedir. Yer kontrol istasyonunda çalışan yazılım, yer veri terminali aracılığıyla hava aracına komut iletmekte, hava aracında bulunan hava veri terminali ise alınan komutları uçuş kontrol sistemi ile görev kontrol bilgisayarına aktarmaktadır. Böylece otonom uçuş süreci, komut aktarımı, durum takibi ve görev verilerinin değerlendirilmesi belirli bir sistem bütünlüğü içinde yürütülmektedir (Akyürek ve Eraslan, 2024).

Yer kontrol istasyonu, operatörün hava aracını izlemesi, yönlendirmesi ve faydalı yükten gelen verileri değerlendirmesi için oluşturulan merkezî birim niteliği taşımaktadır. Bu yapı, yer kontrol bilgisayarı, yer veri terminali ve radyo kontrollü kumanda bileşenlerinden meydana gelmektedir. Yer kontrol bilgisayarı çalışır yazılım, uçuş planlama, uçuş izleme, kontrol komutlarının gönderilmesi, harita verilerinin kullanılması ve faydalı yük görüntülerinin izlenmesi gibi işlevleri yerine getirmektedir. Bilgisayar ile hava aracı arasındaki bağlantı, telemetri modemi ve ilgili haberleşme donanımları üzerinden kurulmaktadır. İnternet bağlantısı, harita bilgilerinin gerçek zamanlı olarak alınması amacıyla sisteme dâhil edilmektedir. Görüntü aktarımı için video alıcısı ve görüntü yakalama modülü kullanılmaktadır (Elmas ve Alkan, 2023).

Yer veri terminali, yer kontrol istasyonu ile hava aracı arasındaki veri alışverişini üstlenen haberleşme birimi olarak tasarlanmaktadır. Telemetri modemi, radyo frekanslı veri bağı üzerinden hava aracından gelen uçuş bilgilerini almakta ve yer kontrol bilgisayara iletmektedir. Bu süreçte komut verileri hava aracına gönderilmekte, hava aracından gelen telemetri ve faydalı yük bilgileri yere aktarılmaktadır. (Akyürek ve Eraslan, 2024).



Şekil 7. ASELSAN tarafından geliştirilen uydu haberleşme terminali-SATCOM (ASELSAN, 2022)

Hava aracı bölümü, sistemin uçan platformunu meydana getirmektedir. Bu platform gövde, kanatlar ve kuyruk düzeninden oluşmakta, aerodinamik yapı uçuşun gerçekleştirilmesine temel oluşturmaktadır. Tasarımda seçilen hava aracının kararlı, yavaş ve dengeli uçuş profiline sahip olması, sistem bileşenlerinin yerleştirilebileceği yeterli iç hacmi barındırması ve yüksek kaldırma kapasitesi taşıması beklenmektedir. Hava aracında kullanılan güç sistemi, uçuş kontrol sistemi, görev kontrol bilgisayarı, hava veri terminali, servolar, itki sistemi ve faydalı yük gibi bileşenlerin enerji gereksinimini karşılamaktadır (Erkut vd., 2023). Bu nedenle güç dağıtımı, uçuş emniyeti ve sistem sürekliliği bakımından temel unsur niteliği taşımaktadır.

Güç sistemi, Lityum-Polimer batarya üzerinden yapılandırılmaktadır. Bu bataryalar, hacim ve ağırlık bakımından yüksek enerji yoğunluğuna sahip oldukları için elektrikli model uçaklarda tercih edilmektedir. Batarya, itki sistemini doğrudan beslemekte, servolar ile elektronik sistemler için ayrı güç dönüştürücüleri kullanılmaktadır (Erkut vd., 2023).

Uçuş kontrol sistemi, hava aracının kararlı ve kontrollü biçimde uçuşmasını yürüten ana elektronik yapı olarak değerlendirilmektedir. Uçuş kontrol birimi, radyo kontrollü kumandadan ve telemetri hattından gelen komutları almakta, algılayıcı verilerini okumakta, kontrol algoritmalarını çalıştırmakta ve servolara gönderilecek komutları üretmektedir. Servolar, darbe genişlik modülasyonu sinyallerini mekanik harekete dönüştürmekte, kanat ve kuyruk üzerindeki kontrol yüzeylerinin hareketini gerçekleştirmektedir (Elmas ve Alkan, 2023).

Algılayıcılar, hava aracının anlık durum değişkenlerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. İvme ölçer, dönü ölçer, küresel konumlama sistemi, sayısal pusula, hava hızı ölçer, yükseklik ve sıcaklık ölçer, mesafe ölçer, devir ölçer ve güç ölçer

bu yapının temel algılayıcı bileşenlerini oluşturmaktadır. İvme ölçer ve dönü ölçer hava aracının hareket ve açısal hız bilgilerini üretmektedir. Küresel konumlama sistemi, zaman, üç boyutlu konum ve hız verilerini işlemciye aktarmaktadır. Sayısal pusula yön bilgisinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Hava hızı ölçer, basınç farkından hava hızını elde etmektedir. Mesafe ölçer, otonom iniş sırasında yer seviyesine olan uzaklığın hassas biçimde belirlenmesinde görev almaktadır (Akyürek ve Eraslan, 2024).

Görev kontrol bilgisayarı, uçuş kontrol biriminin işlem kapasitesini aşan ileri düzey görevlerin yürütülmesi için kullanılmaktadır. Bu birim, algılayıcı verilerini uçuş kontrol biriminden almakta, gerekli kontrol komutlarını üretmekte ve ilgili komutları tekrar uçuş kontrol birimine göndermektedir. (Austin, 2010; Gundlach, 2014). Kamera, görev kontrol bilgisayarı tarafından yönetilmekte ve görev verilerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır.

3. BAĞLANTI ELEMANLARININ GENEL TANIMI VE ÖNEMİ

3.1. Bağlantı Elemanı Kavramı

Yapısal uygulamalar kapsamında kullanılan mekanik sistemlerde, parçaların sökülebilir ya da kalıcı biçimde bir araya getirilmesinde bağlantı elemanları temel bir mühendislik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Montaj işlemlerinin pratik biçimde yürütülmesi ve birleşme bölgelerinde güvenli bir yapı elde edilmesi, bu elemanların tercih edilme gerekçeleri arasında yer almaktadır. Bağlantı elemanlarının işlevlerini istenen düzeyde yerine getirebilmesi için yüksek hassasiyet, uygun tolerans aralıkları ve yeterli mekanik dayanım özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bu tür elemanların üretiminde talaşlı imalat, soğuk dövme ve sıcak dövme yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

Bu üretim tekniklerinden farklı bir uygulama olarak talaşlı imalat kapsamında CNC torna tezgâhlarıyla üretim yapılmakta, bu yöntem diğer üretim süreçlerine kıyasla daha karmaşık bir işlem yapısı göstermektedir (Gökçe 2020). Küçük boyutlu parçaların imalatında soğuk dövme yöntemi öne çıkmakta, hacim bakımından daha büyük parçaların üretiminde sıcak dövme tekniği tercih edilmektedir.

Bağlantı elemanları, kullanım biçimleri ve sökülme durumları dikkate alınarak çözülebilen ve çözilemeyen elemanlar olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Bu ayrım, montaj ya da birleşme işlemi tamamlandıktan sonra oluşan yapının zarar görmeden ayrılıp ayrılamaması esasına dayanmaktadır. Çözülebilen bağlantı elemanları cıvata ve pim gibi parçalarla temsil edilmekte, çözilemeyen bağlantı elemanları ise kaynak ve perçin uygulamaları üzerinden örneklendirilmektedir. Korozyon oluşumunun sınırlandırılması ve yüzey aşınmasının azaltılması amacıyla fosfatlama ve galvanizleme gibi yüzey işlemleri uygulanmaktadır (Kılıçaslan ve İnce 2017). Bağlantı elemanları inşaat, otomotiv, havacılık, denizcilik ve mobilya sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahip bulunmaktadır. Uygulamalarda en sık karşılaşılan bağlantı elemanları arasında pim, çivi, somun, cıvata, vida ve perçin yer almaktadır.

Bağlantı elemanları, mekanik sistemlerin güvenilirliği ve işlevsel sürekliliği açısından kritik mühendislik elemanları arasında değerlendirilmektedir. Cıvata ve somun bağlantılarında uygulanan sıkma torku ile delik toleransı, bağlantı kalitesini doğrudan belirleyen değişkenler arasında bulunmaktadır. Cıvatanın mekanik dayanımı, çalışma performansı ve kullanım ömrü arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır (Kılıçaslan ve İnce 2017). Cıvata ve somun bağlantılarında taşıma kapasitesi, tasarım ve uygulama süreçlerinde dikkate alınması gereken temel değerlerden biri olarak kabul edilmektedir.

4. İHA YAPILARINDA BAĞLANTI ELEMENLARININ ROLÜ

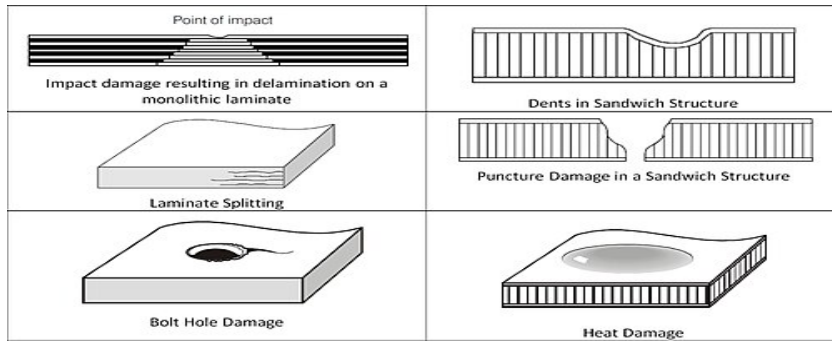
İHA yapılarında bağlantı elemanları, gövde, kanat, kuyruk takımı, taşıyıcı iskelet ve görev donanımlarının bütünleşik bir yapı hâline getirilmesinde temel mekanik bir görev üstlenmektedir. Hava aracı yapılarında kullanılan her bileşenin çevresel koşullar, sıcaklık değişimleri, yük aktarımı, malzeme uyumluluğu ve servis ömrü bakımından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bağlantı elemanlarının seçimi, yalnızca parçaları bir arada tutan basit bir montaj işlemi olarak görülmemekte, yapısal bütünlüğü doğrudan etkileyen tasarım kararı niteliği taşımaktadır. Alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, çelikler ve elyaf takviyeli polimer kompozitler gibi farklı malzemelerin birleştirilmesi sırasında cıvata, perçin, yapıştırıcı bağlantılar ve diğer bağlantı yöntemlerinin nicel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Komorowski vd., 1996).

Hava aracı yapılarında bağlantı elemanı seçimi, birleştirilecek malzemelerin mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilendirilmektedir. Perçinler, çekme yükleri altında sınırlı performans göstermekte, kesme yüklerinin baskın olduğu bağlantılarda daha elverişli bir davranış sergilemektedir. Cıvatalar ise parçaları sıkıştırarak bir arada tutmakta ve bu sıkıştırma etkisiyle temas yüzeyleri arasında oluşan sürtünmeden yararlanmaktadır. Cıvatanın belirli bir yükü taşıma açısından yeterli olması tek başına yeterli kabul edilmemekte, sıkıştırılan parçaların elastisite modülü, rijitliği ve malzeme davranışı da tasarım değerlendirmesine dâhil edilmektedir. Bu nedenle bağlantı tasarımında yalnız bağlantı elemanının dayanımı üzerinden karar verilmemekte, birleşimi oluşturan tüm malzemelerin ortak davranışı incelenmektedir (Jadee, 2015).

İHA yapılarında kullanılan bağlantı elemanları, maruz kalınan yük türlerine göre farklı tasarım gereksinimleri ortaya

çıkarmaktadır. Kanat ve gövde gibi ana taşıyıcı bölgelerde basma, çekme, eğilme, burulma, titreşim ve yorulma etkileri bir arada görülmektedir. Bu etkiler, bağlantı bölgelerinde gerilme yığılmalarına neden olmakta ve bağlantı delikleri çevresinde hasar oluşum riskini artırmaktadır. Cıvatalı ve perçinli bağlantılarda delik geometrisi, bağlantı aralığı, kenar mesafesi, sıkma kuvveti ve malzeme kalınlığı, bağlantı kalitesini belirleyen değişkenler arasında yer almaktadır. Perçin ya da cıvata sıraları boyunca oluşan yük aktarımı, kesme hasarı, yataklama hasarı ve net kesit hasarı gibi farklı göçme biçimleri üzerinden değerlendirilmektedir (Jadee, 2015).

Kompozit malzemelerin kullanıldığı İHA yapılarında bağlantı elemanlarının rolü daha karmaşık bir nitelik kazanmaktadır. Kompozit yapılara bağlantı deliği açılması, elyafların zarar görmesine, delik çevresinde gerilme yoğunlaşmasına ve nem girişine açık bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Perçinlerin montaj sırasında genişleme eğilimi göstermesi, kompozit tabakalarda ayrılma hasarı meydana getirebilmektedir. Bu nedenle kompozit bağlantılarda perçin kullanımı sınırlı değerlendirilmektedir. Cıvatalı bağlantılar ise kompozit yapılarda zayıf halka olarak tanımlanmakta, delik çevresinde oluşan karmaşık gerilme alanları nedeniyle taşıma kapasitesi üzerinde hassas bir etki oluşturmaktadır.



Şekil 8. Laminat ve sandviç yapıların tipik hasar durumları (Iarve et al., 2015)

Alüminyum ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin birlikte kullanıldığı İHA yapılarında galvanik korozyon riski dikkate alınmaktadır. Karbon kompozit yüzeyle temas eden alüminyum bağlantı elemanları, elektriksel potansiyel farkı nedeniyle hızlanan korozyon davranışı gösterebilmektedir. Bu durumda alüminyum perçin, cıvata, bağlantı elemanı ya da somun anot gibi davranmakta, geniş karbon kompozit yüzey ise katodik etki oluşturmaktadır. Bu etkileşim korozyonu hızlandırmaktadır. Bu nedenle karbon elyaf kompozitlerin birleştirilmesinde Ti-6Al-4V titanyum alaşımlı bağlantı elemanları daha uyumlu bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Bir diğer yaklaşım, alüminyum ile karbon elyaf kompozit arasına cam kumaş temelli elektriksel yalıtım katmanı yerleştirilmesiyle doğrudan temasın sınırlandırılmasıdır (Komorowski vd., 1996).

5. İHA’LARDA KULLANILAN BAŞLICA BAĞLANTI ELEMANLARI

İnsansız hava araçlarında kullanılan bağlantı elemanları, hava aracının yapısal bütünlüğünün korunması, görev donanımlarının güvenli biçimde taşınması ve uçuş sırasında oluşan titreşimlerin bağlantı bölgelerinde olumsuz etki yaratmasının sınırlandırılması bakımından temel mühendislik bileşenleri arasında yer almaktadır. İHA yapılarında gövde, motor bağlantı noktaları, elektronik muhafazalar, batarya bölmeleri, kamera taşıyıcıları, sensör yuvaları ve faydalı yük sistemleri farklı bağlantı elemanlarıyla bir araya getirilmektedir (Hall-Fast, 2025).

İHA sistemlerinde en yaygın kullanılan bağlantı elemanlarının başında makine vidaları gelmektedir. Metrik ölçü sistemine sahip küçük çaplı vidalar, özellikle motor montajları, elektronik kart bağlantıları, gövde parçaları ve yardımcı donanımların sabitlenmesinde kullanılmaktadır. Bu vidalar

sökülebilir bağlantı oluşturdıkları için bakım, onarım ve parça değişimi gerektiren bölgelerde tercih edilmektedir. Motor ve pervane kaynaklı sürekli titreşimler nedeniyle bu bağlantılarda gevşeme riski ortaya çıkmaktadır. Bu riskin azaltılması amacıyla kilitlemeli somunlar, naylon insertli somunlar, diş kilitleyici kimyasallar ve kontrollü sıkma torku uygulamaları kullanılmaktadır (Marciszewski, 2024).

İnce cidarlı alüminyum ya da paslanmaz çelik muhafazalarda kendinden perçinlemeli somunlar, saplamalar ve standofflar yaygın biçimde değerlendirilmektedir. Bu elemanlar, ince sac yapılarında kalıcı dişli bağlantı noktaları oluşturmakta ve elektronik modüllerin, haberleşme birimlerinin, uçuş kontrol kartlarının ya da sensör muhafazalarının düzenli yerleşimine katkı vermektedir. Standofflar, özellikle baskı devre kartlarının gövdeden belirli bir mesafede tutulması ve kısa devre riskinin azaltılması için kullanılmaktadır (Hall-Fast, 2025).

Rivet nut olarak adlandırılan perçin somunlar, yalnızca tek taraftan erişim bulunan bölgelerde dişli bağlantı elde edilmesini sağlamaktadır. Batarya tepsileri, kamera bağlantı ayakları, faydalı yük taşıyıcıları ve bakım gerektiren bağlantı noktalarında bu elemanlardan yararlanılmaktadır. Kör perçinler ise sökülmesi gerekmeyen hafif yapısal bağlantılarda kullanılmakta, kalıcı ve düşük ağırlıklı birleştirme sağlamaktadır. Kompozit İHA yapılarında yapıştırma destekli bağlantı elemanları öne çıkmaktadır (Marciszewski, 2024). Bu tür bağlantılar, yükün daha geniş alana yayılmasına katkı vermekte ve kompozit yüzeylerde delik açılmasından kaynaklanan hasar riskini azaltmaktadır.

Bağlantı elemanlarında paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları, titanyum ve mühendislik polimerleri kullanılmaktadır. Titanyum bağlantı elemanları yüksek dayanım-ağırlık oranı nedeniyle kritik uygulamalarda tercih edilmektedir. Alüminyum

alaşımları düşük ağırlık gerektiren bölgelerde kullanılmakta, paslanmaz çelik ise dayanım ve korozyon direnci bakımından dengeli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Hall-Fast, 2025; Marciszewski, 2024).



Şekil 9. Titanyum alaşımlarının üstünlükleri (Titanyum Alaşımlarının Havacılıkta 10 Maddelik Üstünlüğü – Nanokar Nanoteknoloji, t.y.)

6. SONUÇLAR

Bu araştırma bağlamında insansız hava araçlarında kullanılan bağlantı elemanları, yalnızca montajı tamamlayan yardımcı parçalar olarak ele alınmamış, hava aracının yapısal bütünlüğünü, uçuş emniyetini, bakım sürekliliğini ve görev başarısını doğrudan etkileyen mühendislik bileşenleri olarak değerlendirilmiştir. İHA sistemlerinin gövde, kanat, kuyruk takımı, motor taşıyıcıları, iniş takımı, elektronik muhafazalar, sensör yuvaları ve faydalı yük taşıyıcıları gibi çeşitli alt yapılardan oluşması, bağlantı elemanlarının çok yönlü bir tasarım ölçütü hâline gelmesine neden olmaktadır. Bu sebeple bağlantı elemanı seçimi yapılırken hafiflik, mekanik dayanım, titreşim direnci, yorulma davranışı, korozyon dayanımı, bakım kolaylığı ve malzeme uyumluluğu birlikte değerlendirilmektedir.

Araştırmada incelenen veriler, İHA yapılarında en yaygın kullanılan bağlantı elemanlarının cıvata, somun, vida, perçin, pim, rondela, kilitleme elemanları, perçin somunlar, standofflar, yapıştırıcı bağlantılar ve hibrit bağlantı çözümleri olduğunu göstermektedir. Sökülebilir bağlantılar bakım, onarım ve parça değişimi gerektiren bölgelerde öne çıkmaktadır. Kalıcı bağlantılar ise düşük ağırlık, montaj sürekliliği ve yapısal sadelik gerektiren alanlarda tercih edilmektedir. Motor ve pervane kaynaklı titreşimler, bağlantı bölgelerinde gevşeme riskini artırmaktadır. Bu sebeple kontrollü sıkma torku, kilitlemeli somunlar, dış kilitleyiciler ve uygun yüzey işlemleri güvenilir bağlantı tasarımının ayrılmaz unsurları arasında yer almaktadır.

Kompozit malzemelerin İHA yapılarında yaygınlaşması, bağlantı elemanı tasarımını daha hassas bir mühendislik sorunu hâline getirmektedir. Kompozit yapılarda delik açılması, lif hasarı, tabakalar arası ayrılma, gerilme yığılması ve nem girişi gibi riskler doğurmaktadır. Bu sebeple kompozit yüzeylerde yükü daha geniş alana dağıtan bağlantı çözümleri ve yapıştırma destekli sistemler öne çıkmaktadır. Karbon fiber kompozitlerle alüminyum gibi metallerin birlikte kullanıldığı bölgelerde galvanik korozyon riski dikkate alınmakta, bu riskin azaltılması için titanyum, paslanmaz çelik, kaplama uygulamaları veya yalıtıcı ara katmanlar tercih edilmektedir.

Neticede, İHA'larda bağlantı elemanları küçük boyutlarına rağmen sistem güvenilirliği üzerinde belirleyici etkiye sahip bulunmaktadır. Uygun seçilmeyen ya da hatalı monte edilen bağlantı elemanları, yapısal hasara, titreşim kaynaklı gevşemeye, yorulma çatlaklarına, korozyon problemlerine ve görev kaybına neden olabilmektedir. Bu sebeple İHA tasarımında bağlantı elemanları, aracın görev profili, malzeme yapısı, çevresel koşulları ve bakım gereksinimleriyle birlikte ele alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Akyürek, İ., & Eraslan, E. (2024). İnsansız hava araçlarında insan hatasının etkilerinin sistematik analizi ve sınıflandırılması-İHA tasarımı ve ergonomi. *Researcher*, 4(2), 157–165.
- ASELSAN (2022). CATS (Common Aperture Targeting System).
<https://www.aselsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/elektronik-optik-sistemler/>, Accessed 05.07.2022.
- Austin, R. (2010). Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Wiley.
- Borky, J. M. (1997). Payload technologies and applications for uninhabited air vehicles (UAVs). In 1997 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Vol. 3, pp. 267–283). IEEE.
- Camanho, P. P., & Matthews, F. L. (1997). Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(6), 529–547.
[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00004-3)
- Cavalcanti, W. L., Brune, K., Noeske, M., Tserpes, K., Ostachowicz, W. M., & Schlag, M. (Eds.). (2021). Adhesive bonding of aircraft composite structures: Non-destructive testing and quality assurance concepts. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92810-4>
- Çetinkaya, S. G., & Koç, M. (2023). Türkiye'nin insansız hava araçları serüveni. *Anadolu Strateji Dergisi*, 5(1), 1–27.
- Elmas, E. E., & Alkan, M. (2023). Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 929–940.

- Erkut, R., Efendioğlu, B., Yılmaz, H. S., & Özsoy, K. (2023). Hedefe odaklanan insansız hava aracın üç boyutlu baskı teknolojisi ile üretimi ve kontrolü. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(3), 571–587.
- Federal Aviation Administration. (2015). Operation and certification of small unmanned aircraft systems (FAA-2015-0150; Notice No. 15-01). U.S. Department of Transportation.
- Gökçe, H. (2020). AL 5083 alüminyum malzemeye vida açma işleminde kılavuz geometrisi etkisinin incelenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 242–247.
- Gundlach, J. (2014). *Designing unmanned aircraft systems: A comprehensive approach* (2nd ed.). American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Hall-Fast. (2025). Fasteners for use in drones: Advanced bonding solutions for next-generation UAV technology. <https://www.hall-fast.com/news/post/fasteners-for-use-in-drones-advanced-bonding-solutions-for-next-generation-uav-technology> (Erişim Tarihi: 08.06.2026).
- Iarve E, Breitzman T, Ripberger E Structural Integrity and Durability of Advanced Composites: Innovative Modelling Meth
- Ibrahim, R. A., & Pettit, C. L. (2005). Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*, 279(3–5), 857–936. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.064>
- International Civil Aviation Organization. (2011). Unmanned aircraft systems (UAS) (Circular 328-AN/190).
- İHA Kullanım Alanları - Shark Aviation, t.y.

- İHA, İHA ve Drone: Aralarındaki Fark Nedir? - JOUAV, t.y.
- İnsansız Hava Aracı Eğitimleri - Savunma | Havacılık | Teknoloji
| Analiz | Politika, t.y.
- Jadee, K. J. (2015). Progressive failure analysis and failure map into plain weave glass fibre reinforced polymer bolted joint. *American Journal of Materials Science and Engineering*, 3(2), 21–28.
- Jiao, Z., Zhang, Y., Xin, J., Mu, L., Yi, Y., Liu, H., & Liu, D. (2019). A Deep Learning Based Forest Fire Detection Approach Using UAV and Yolov3. In *2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)* (pp. 1-5). IEEE.
- Kılıçaslan, C., & İnce, U. (2017). Tool life enhancement in cold bolt forging process: Effect of forging stage design. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(5), 961–967.
<https://doi.org/10.16984/SAUFENBILDER.286029>
- Kim D, Seo H, Jang H *Journal of Marine Science and Engineering* 2021, Vol. 9, Page 726 (2021) 9(7) 726
- Komorowski, J. P., Bellinger, N. C., Gould, R. W., Marincak, A., & Reynolds, R. (1996). Quantification of corrosion in aircraft structures with double pass retroreflection. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 42(2), 76–82.
- Kusak, L., Unel, F., AlpTekin, A., Celik, M., & Yakar, M. (2021). Apriori association rule and K-means clustering algorithms for interpretation of pre-event landslide areas and landslide inventory mapping. *Open Geosciences*, 13(1), 1226–1244.
- Libelium. (2015). Calibrated air quality sensors for smart cities.
<https://www.libelium.com/libeliumworld/calibrated-air->

quality-gas-dust-particle-matter-pm10-smart-cities/
(Erişim Tarihi: 08.06.2026).

Marciszewski, B. (2024, 15 Haziran). Fastener use in UAV construction: Lightweight and high-strength solutions. Metric Bolt. <https://www.metricbolt.com/fastener-use-in-uav-construction/> (Erişim Tarihi: 08.06.2026).

Song, G.-L., Zhang, C., Chen, X., & Zheng, D. (2021). Galvanic activity of carbon fiber reinforced polymers and electrochemical behavior of carbon fiber. *Corrosion Communications*, 1, 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.05.003>

Thoppul, S. D., Finegan, J., & Gibson, R. F. (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures: A review. *Composites Science and Technology*, 69(3–4), 301–329. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.037>

Titanyum Alaşımlarının Havacılıkta 10 Maddelik Üstünlüğü – Nanokar Nanoteknoloji, t.y.

Wang B, Fang X, Xue Y *Journal of Adhesion Science and Technology* (2023) 37(3) 469-485

UÇAK-HAVACILIK-UZAY MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com